



**PROPOSAL TUGAS AKHIR - TL 141584**

**PENGARUH PERSEN MASSA POLIAMIDA-6 DAN  
TEMPERATUR SINTERING TERHADAP  
MIKROSTRUKTUR DAN SIFAT MEKANIK PROYEKTIL  
KOMPOSIT TEMBAGA - POLIAMIDA(Cu-PA6)**

**HIZKIA ALPHA DEWANTO**  
NRP. 2711100019

Dosen Pembimbing  
Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si  
Rindang Fajarin, S.Si, M.Si

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI**  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2014

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT– TL 141584**

**INFLUENCE OF POLYAMIDE-6 MASS PERCENTAGE  
AND SINTERING TEMPERATURE TO  
MICROSTRUCTURE AND MENCHANICAL  
PROPERTIES OF COPPER–POLYAMIDE (Cu-PA6)  
COMPOSITE PROJECTILE**

**HIZKIA ALPHA DEWANTO**

**27 11 100 019**

**SUPERVISOR**

**Dr. Widyastuti S.Si, M.Si**

**Rindang Fajarin S.Si, M.Si**

**Material and Metallurgical Engineering  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015**



**PENGARUH PERSEN BERAT POLIAMIDA-6 DAN  
TEMPERATUR SINTERING TERHADAP  
MIKROSTRUKTUR DAN SIFAT MEKANIK  
PROYEKTIL KOMPOSIT TEMBAGA – POLIAMIDA  
(Cu-PA6)**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Material Inovatif  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material Dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

oleh:

**HIZKIA ALPHA DEWANTO  
NRP. 2711 100 019**

Disetujui oleh tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si..... (Pembimbing I)
2. Rindang Fajarin, S.Si., M.Si..... (Pembimbing II)





## PENGARUH PERSEN MASSA POLIAMIDA DAN TEMPERATUR SINTERING TERHADAP MIKROSTRUKTUR DAN SIFAT MEKANIK PROYEKTIL KOMPOSIT TEMBAGA – POLIAMIDA 6

**Nama Mahasiswa** : Hizkia Alpha Dewanto  
**NRP** : 2711100019  
**Jurusan** : Teknik Material dan Metalurgi  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si

### ABSTRAK

Proyektil untuk senapan dan pistol selama ini terbuat dari logam timbal yang bersifat racun. Selain itu, proyektil normal beresiko mengalami *ricochet* yang dapat mengakibatkan kerusakan, luka-luka, bahkan korban jiwa. Oleh karena itu, saat ini dikembangkan proyektil yang memiliki dua sifat sekaligus: berbahan baku non timbal dan mampu pecah pada penumbukan (*frangible*). Penelitian ini meneliti amunisi *frangible* berbahan baku komposit tembaga dan poliamida-6 dari segi sifat mekanik dan karakterisasi material. Variabel dalam penelitian ini adalah persen massa poliamida-6 dalam proyektil yaitu 0,5, 1, dan 1,5%, serta temperatur sintering proyektil pascakompaksi yaitu 200, 250, dan 300°C. Tahapan pembuatan spesimen proyektil adalah *dry mixing* dengan *magnetic stirrer*, kompaksi untuk pemadatan awal spesimen pada tekanan 300 MPa selama 5 menit, dan sintering untuk penguatan ikatan antar partikel dalam spesimen selama 30 menit. Uji mekanik yang dilakukan adalah uji kekerasan dan uji tekan. Uji mekanik dilakukan untuk mendapatkan nilai kekerasan, kekuatan tekan, dan modulus elastisitas proyektil dan membandingkan nilai tersebut dengan proyektil *frangible* yang sudah ada di pasaran. Uji karakterisasi yang dilakukan adalah pengamatan XRD dan SEM dengan tujuan mengetahui mekanisme ikatan antar partikel proyektil.

**Kata kunci:** Metalurgi serbuk, *frangible*, uji mekanik, karakterisasi

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



**INFLUENCE OF POLYAMIDE MASS PERCENTAGE  
AND SINTERING TEMPERATURE TO  
MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL  
PROPERTIES OF Cu – POLYAMIDE 6 COMPOSITE  
PROJECTILE**

**Student name** : Hizkia Alpha Dewanto  
**NRP** : 2711100019  
**Department** : Materials and Metallurgical Eng.  
**Mentor Lecturer** : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si

**ABSTRACT**

Majority of projectile for small firearms made of toxic lead and prone to ricochet. Thus, lead-free projectile with ability to break upon contact with hard surface or “frangible” is needed. This research will investigate frangible projectile made of copper and polyamide 6 composite from mechanical properties and characterization side. Variables in this research are polyamide 6 mass percentage, there are 0,5, 1, and 1,5%, and projectile sintering temperature, there are 200, 250, and 300°C. From testing data obtained that variable with most optimal mechanical properties and density for frangible application is polyamide of 0.5% mass percent with average compressive strength of 127.76 MPa, hardness of 21.33 HRB and density of 6.77 gr/cm<sup>3</sup>, then heating/sintering temperature of 250°C with average compressive strength of 116.73 MPa, hardness of 20.44 HRB and density of 6.66 gr/cm<sup>3</sup>. By microstructure, the important factor for the mechanical properties of specimen is porosity formed around polyamide particles, diffusion of polyamide towards porosity, and interlocking of copper particles.

**Keywords: Powder Metallurgy, frangible, mechanical test, Characterization**

## KATA PENGANTAR

Penulis mengucapkan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena hanya atas RahmatNya penelitian dalam rangka tugas akhir ini dapat dilaksanakan.

Penelitian ini, secara garis besar, adalah penyelidikan tentang sifat-sifat mekanik dan fisik komposit metal-polimer, dalam hal ini tembaga dan poliamida, dengan cara produksi kompaksi dan sintering. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik komposit tembaga-poliamida 6 dalam rangka evaluasi untuk penggunaannya sebagai proyektil *frangible*. Proyektil *frangible*, yang memiliki sifat pecah saat menumbuk permukaan keras, diminati untuk penggunaan latihan menembak maupun sebagai amunisi non-letal. Diharapkan dari penelitian ini, pengembangan di bidang industri persenjataan dalam negeri semakin berkembang.

Penulis berterima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas segala sesuatunya.
2. Orang tua dan segenap keluarga penulis atas segala dukungan penuh, terlebih dukungan moral.
3. Dr. Widyastuti S.Si, M.Si dan Rindang Fajarin S.Si, M.Si atas bimbingannya yang tidak jemu-jemu kepada penulis dan segala saran untuk memperbaiki laporan penelitian ini.
4. Romlan Sidiq sebagai rekan kerja atas segala bantuannya dalam penelitian ini.
5. Seluruh rekan-rekan di Laboratorium Fisika Material atas seluruh dukungan dan dorongan semangat.

Sidoarjo, Juli 2015

Hizkia A.D.



## DAFTAR ISI

Halaman Judul .....	i
Lembar Pengesahan .....	ii
Abstrak .....	iii
Abstrak (Bahasa Inggris).....	iv
Kata Pengantar.....	v
Daftar Isi .....	vi
Daftar Tabel.....	viii
Daftar Gambar .....	ix
Bab I: Pendahuluan	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Batasan Masalah .....	3
1.4. Tujuan Penelitian .....	3
1.5. Manfaat Penelitian .....	3
Bab II: Tinjauan Pustaka	
2.1. Proyektil Frangible Bebas Timbal .....	5
2.2. Bahan Baku Proyektil.....	8
2.2.1. Timbal .....	8
2.2.2. Tembaga .....	9
2.2.3. Poliamida-6.....	10
2.3. Komposit .....	11
2.4. Kompaksi dan Sintering .....	13
2.4.1. Kompaksi.....	13
2.4.2. Sintering .....	16
2.5. Modulus Resilien .....	17
2.6. Penelitian-penelitian Terkait.....	17
Bab III: Metodologi Penelitian	
3.1. Bahan-bahan Percobaan .....	31
3.2. Alat-alat Percobaan .....	31
3.3. Diagram Alir Penelitian.....	34
3.4. Pelaksanaan Penelitian .....	35
3.4.1. Preparasi Sampel.....	35
3.4.2. Mixing .....	37



3.4.3. Kompaksi.....	37
3.4.4. Sintering .....	38
3.4.5. Pengujian .....	38
Bab IV: Analisa Data dan Pembahasan	
4.1. Analisa Data .....	41
4.1.1. Proses Pembuatan Komposit Cu-Poliamida .....	41
4.1.2. Hasil Analisa Densitas dan Porositas Komposit Tembaga-Poliamida .....	47
4.1.3 Hasil analisa morfologi SEM.....	51
4.1.4 Hasil Analisa Pengujian Mekanik .....	62
4.2. Pembahasan .....	67
Bab V: Kesimpulan dan Saran	
5.1. Kesimpulan.....	73
5.2. Saran.....	73
Daftar Pustaka .....	75
Lampiran	



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Sifat Material Timbal (ASM volume 4) .....	9
Tabel 2. 2. Sifat Material Tembaga (ASM volume 4) .....	10
Tabel 2. 3 Sifat Material Poliamida-6 (Honeywell).....	10
Tabel 2.4. Simpulan Beberapa Riset Terpaten mengenai Amunisi Frangible .....	18
Tabel 2.5. Simpulan Beberapa Riset Nonpaten mengenai Amunisi Frangible .....	25
Tabel 3.1. Nilai Massa Cu dan Poliamida-6 Berdasarkan Perbandingan Massa.....	36
Tabel 3.2. Rancangan Penelitian .....	41
Tabel 4.1. Rerata nilai hasil pengujian terhadap persen berat poliamida .....	68
Tabel 4.2. Rerata nilai hasil pengujian terhadap temperatur sintering.....	68



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Bagian-bagian dari peluru .....	5
Gambar 2.2. Amunisi Glaser Blue® safety slug .....	7
Gambar 2.3. Diagram penggolongan tipe-tipe proyektil frangible inovasi terkait.....	24
Gambar 2.4. a) Nilai densitas green dengan berbagai komposisi Sn; b) Nilai densitas sinter dengan berbagai tekanan kompaksi. ....	26
Gambar 2.5. Pengaruh temperatur sintering terhadap (a) kekuatan tekan dan modulus elastisitas dan (b) frangibility factor proyektil .....	27
Gambar 2.6. Perbandingan antara frangibility factor dan modulus elastisitas terhadap temperatur sintering proyektil Cu-10% wt Sn....	28
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	34
Gambar 4.1. a) Serbuk Tembaga, b) Serbuk Poliamida-6, c) Serbuk hasil mixing tembaga dan poliamida .....	43
Gambar 4.2. a) Foto SEM serbuk tembaga dan hasil pengukurannya, perbesaran 2000x, b) Foto SEM serbuk poliamida dan hasil pengukurannya, coating emas, perbesaran 500x.....	44
Gambar 4.3. Spesimen pascakompaksi, dengan dimensinya ..	46
Gambar 4.4. Foto SEM terhadap spesimen produk kompaksi, Cu: tembaga, PA: poliamida, P: porositas. Perbesaran 2000x.....	47
Gambar 4.5. Perbandingan specimen pasca sintering dan specimen prasintering.....	48
Gambar 4.6. Pengaruh persen berat poliamida dalam spesimen terhadap densitas spesimen .....	49
Gambar 4.7. Pengaruh persen berat poliamida dalam spesimen terhadap porositas spesimen .....	50



Gambar 4.8. Pengaruh temperatur sintering terhadap densitas spesimen Cu-PA 6 .....	51
Gambar 4.9. Pengaruh temperatur sintering terhadap porositas spesimen Cu-PA 6.....	52
Gambar 4.10. Mikrostruktur spesimen pascakompaksi, sebelum disinter dengan komposisi poliamida (a) 0,5% (b) 1,0% dan (c) 1,5%. Perbesaran 500x.....	54
Gambar 4.11. Foto SEM spesimen pascasinter, komposisi 0.5%, temperatur 200° C (a), 250° C (b), dan 300° C (c). Perbesaran 500x.....	56
Gambar 4.12. Foto SEM spesimen pascasinter, komposisi 1%, temperatur (a)200°C, (b)250°C, dan (c)300°C. Perbesaran 500x.....	57
Gambar 4.13. Foto SEM spesimen pascasinter, komposisi 1.5%, temperatur 200°C (a), 250°C (b), dan 300°C (c). Perbesaran 500x.....	59
Gambar 4.14. Detail dari Foto SEM spesimen persen berat poliamida 0.5% dan temperatur sinter 200°C (a), poliamida 0.5% dan temperatur sinter 250°C (b) dan poliamida 1% temperatur sinter 300°C (c) .....	61
Gambar 4.15. Foto SEM dari patahan spesimen pascauji tekan, Poliamida 0.5%, temperatur 300°C.....	62
Gambar 4.16. Grafik hubungan antara persen massa poliamida dengan kekuatan tekan spesimen dan kekerasan spesimen .....	63
Gambar 4.17. Grafik hubungan antara temperatur sintering poliamida (°C) dengan kekuatan tekan spesimen dan kekerasan .....	65
Gambar 4.18. a) Grafik hubungan antara persen berat poliamida	



pada spesimen dengan modulus elastisitas spesimen.	
b) Grafik hubungan antara temperatur sintering spesimen dan modulus elastisitas spesimen .....	67

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Sifat Material Timbal (ASM volume 4).....	9
Tabel 2. 2. Sifat Material Tembaga (ASM volume 4) .....	10
Tabel 2. 3 Sifat Material Poliamida-6 (Honeywell).....	10
Tabel 2.4. Simpulan Beberapa Riset Terpaten mengenai Amunisi Frangible.....	18
Tabel 2.5. Simpulan Beberapa Riset Nonpaten mengenai Amunisi Frangible.....	25
Tabel 3.1. Nilai Massa Cu dan Poliamida-6 Berdasarkan Perbandingan Massa .....	36
Tabel 3.2. Rancangan Penelitian .....	41
Tabel 4.1. Rerata nilai hasil pengujian terhadap persen berat poliamida .....	68
Tabel 4.2. Rerata nilai hasil pengujian terhadap temperatur sintering .....	68

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Bagian-bagian dari peluru.....	5
Gambar 2.2. Amunisi Glaser Blue® safety slug .....	7
Gambar 2.3. Diagram penggolongan tipe-tipe proyektil frangible inovasi terkait .....	24
Gambar 2.4. a) Nilai densitas green dengan berbagai komposisi Sn; b) Nilai densitas sinter dengan berbagai tekanan kompaksi. ....	26
Gambar 2.5. Pengaruh temperatur sintering terhadap (a) kekuatan tekan dan modulus elastisitas dan (b) frangibility factor proyektil .....	27
Gambar 2.6. Perbandingan antara frangibility factor dan modulus elastisitas terhadap temperatur sintering proyektil Cu-10% wt Sn....	28
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	34
Gambar 4.1. a) Serbuk Tembaga, b) Serbuk Poliamida-6, c) Serbuk hasil mixing tembaga dan poliamida .....	43
Gambar 4.2. a) Foto SEM serbuk tembaga dan hasil pengukurannya, perbesaran 2000x, b) Foto SEM serbuk poliamida dan hasil pengukurannya, coating emas, perbesaran 500x.....	44
Gambar 4.3. Spesimen pascakompaksi, dengan dimensinya ..	46
Gambar 4.4. Foto SEM terhadap spesimen produk kompaksi, Cu: tembaga, PA: poliamida, P: porositas. Perbesaran 2000x .....	47
Gambar 4.5. Perbandingan specimen pasca sintering dan specimen prasintering.....	48
Gambar 4.6. Pengaruh persen berat poliamida dalam spesimen terhadap densitas spesimen .....	49
Gambar 4.7. Pengaruh persen berat poliamida dalam spesimen terhadap porositas spesimen .....	50





Gambar 4.8. Pengaruh temperatur sintering terhadap densitas spesimen Cu-PA 6.....	51
Gambar 4.9. Pengaruh temperatur sintering terhadap porositas spesimen Cu-PA 6.....	52
Gambar 4.10. Mikrostruktur spesimen pascakompaksi, sebelum disinter dengan komposisi poliamida (a) 0,5% (b) 1,0% dan (c) 1,5%. Perbesaran 500x.....	54
Gambar 4.11. Foto SEM spesimen pascasinter, komposisi 0.5%, temperatur 200° C (a), 250° C (b), dan 300° C (c). Perbesaran 500x.....	56
Gambar 4.12. Foto SEM spesimen pascasinter, komposisi 1%, temperatur (a)200°C, (b)250°C, dan (c)300°C. Perbesaran 500x.....	57
Gambar 4.13. Foto SEM spesimen pascasinter, komposisi 1.5%, temperatur 200°C (a), 250°C (b), dan 300°C (c). Perbesaran 500x.....	59
Gambar 4.14. Detail dari Foto SEM spesimen persen berat poliamida 0.5% dan temperatur sinter 200°C (a), poliamida 0.5% dan temperatur sinter 250°C (b) dan poliamida 1% temperatur sinter 300°C (c) .....	61
Gambar 4.15. Foto SEM dari patahan spesimen pascauji tekan, Poliamida 0.5%, temperatur 300°C.....	62
Gambar 4.16. Grafik hubungan antara persen massa poliamida dengan kekuatan tekan spesimen dan kekerasan spesimen.....	63
Gambar 4.17. Grafik hubungan antara temperatur sintering poliamida (°C) dengan kekuatan tekan spesimen dan kekerasan .....	65
Gambar 4.18. a) Grafik hubungan antara persen berat poliamida	



pada spesimen dengan modulus elastisitas spesimen.	
b) Grafik hubungan antara temperatur sintering spesimen dan modulus elastisitas spesimen.....	67



## **BAB I** **PENDAHULUAN**

### **I.1. Latar Belakang**

Saat ini, pengembangan proyektil berfokus pada dua hal utama. Pertama, pemanfaatan bahan baku proyektil yang ramah lingkungan dan tidak beracun seiring dengan diketahuinya bahaya racun pada timbal sebagai bahan baku utama proyektil. Logam timbal bersifat racun bagi sistem saraf manusia. Kedua, dorongan untuk mendesain proyektil yang dapat pecah saat menumbuk permukaan keras (*frangible*). Dorongan ini muncul karena penggunaan proyektil peluru biasa yang mampu menembus perisai dinilai beresiko tinggi pada penggunaan di lokasi-lokasi tertentu seperti di lapangan tembak (*firing range*) dan medan tempur di dalam bangunan. Kedua lokasi tersebut memiliki resiko pemantulan proyektil (*ricochet*) tinggi yang dapat mengakibatkan bahaya peluru menyasar (*stray bullet*). Dengan penggunaan proyektil *frangible*, pada saat proyektil menumbuk permukaan keras, proyektil akan pecah menjadi serpihan-serpihan berukuran sangat kecil.

Menurut hasil penelitian Firmansyah (2015) dengan bahan baku komposit serbuk metal tembaga – 10% timah didapatkan bahwa semakin rendah temperatur pemanasan (*sintering*) komposit maka kecenderungan proyektil untuk pecah pada penumbukan (*frangibility/frangibilitas*) makin besar, dan ukuran pecahan proyektil makin kecil. Menurut penelitian Anugraha (2015) pada proyektil dari komposit serbuk tembaga – timah terbentuk senyawa intermetalik yang menimbulkan kegetasan pada proyektil yaitu  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  dan  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Penelitian Anugraha juga menunjukkan bahwa kekuatan mekanik proyektil meningkat seiring dengan peningkatan temperatur sintering. Disimpulkan dari kedua riset tersebut bahwa pemanasan pada temperatur yang semakin tinggi menghasilkan modulus elastisitas yang semakin besar, menurunkan frangibilitas proyektil.



Pengembangan proyektil peluru *frangible* lainnya adalah proyektil yang terbuat campuran serbuk logam dan polimer. Dasar teori dari penggunaan komposit ini adalah polimer sebagai pengikat logam akan pecah pada tekanan berlebih, misalnya pada penumbukan proyektil dengan material keras setelah ditembakkan. Namun, polimer tetap memiliki daya tahan terhadap tekanan yang lebih rendah, misalnya pada saat manufaktur proyektil maupun dalam proses penembakan di dalam senjata api. Beberapa literatur telah mengemukakan penggunaan material komposit ini, sayangnya tidak ada data maupun pembahasan mengenai sifat proyektil secara mendalam, baik mikrostruktur, fasa material yang terbentuk, maupun optimasi komposisi komposit untuk menghasilkan proyektil dengan sifat terbaik.

Maka, penelitian ini akan menganalisa prototipe proyektil *frangible* dengan bahan baku komposit serbuk tembaga (Cu) dengan serbuk polimer poliamida-6 (PA-6, Nylon®-6). Variabel ubah dalam penelitian ini adalah persen kandungan polimer dalam komposit proyektil dan temperatur pemanasan proyektil. Respon yang diamati dalam penelitian ini adalah sifat proyektil, baik sifat mekanik berupa kekuatan tekan, kekerasan, dan modulus elastisitas, maupun mikrostruktur proyektil untuk melihat dan menganalisis fase material yang muncul.

## **I.2. Perumusan Masalah**

Perumusan masalah yang menjadi fokus penelitian ini adalah:

1. Berapa persen berat poliamida-6 terhadap massa total proyektil komposit tembaga-poliamida-6 yang menghasilkan sifat mekanik paling optimal sebagai proyektil *frangible*?
2. Berapa temperatur pemanasan proyektil komposit tembaga-poliamida-6 yang menghasilkan sifat mekanik paling optimal sebagai proyektil *frangible*?

3. Bagaimana pengaruh mikrostruktur dan karakterisasi proyektil komposit tembaga-poliamida-6 terhadap sifat mekanik proyektil?

### **I.3. Batasan Masalah**

Agar didapatkan analisa dan kesimpulan yang akurat dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah serta tidak menyimpang dari tinjauan permasalahan, maka batasan-batasan dalam penelitian ini adalah:

1. Lingkungan dianggap tidak berpengaruh.
2. Serbuk tembaga dan poliamida-6 merupakan serbuk pro analisis (PA).
3. Distribusi serbuk dianggap homogen.
4. Pengotor diabaikan.
5. Tekanan kompaksi dan waktu pemanasan konstan.

### **I.4. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui persen berat poliamida-6 terhadap massa total proyektil komposit tembaga-poliamida-6 yang menghasilkan sifat mekanik paling optimal sebagai proyektil *frangible*.
2. Mengetahui temperatur pemanasan proyektil komposit tembaga-poliamida-6 yang menghasilkan sifat mekanik paling optimal sebagai proyektil *frangible*.
3. Menganalisa pengaruh mikrostruktur dan karakterisasi proyektil komposit tembaga-poliamida-6 terhadap sifat mekanik proyektil.

### **I.5. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan mampu menganalisa faktor-faktor yang mempengaruhi dan menghasilkan sifat peluru *frangible* yang optimal dari bahan baku komposit logam polimer. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi bagi penelitian lainnya, terutama pengembangan peluru *frangible* dengan biaya



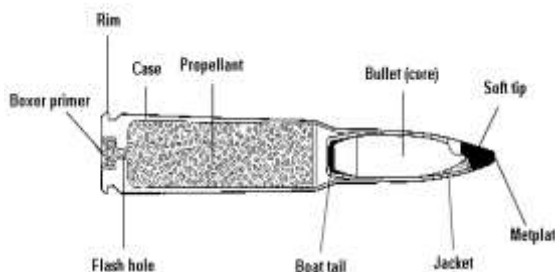
produksi rendah namun dengan sifat unggul sehingga dapat memajukan industri persenjataan nasional.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Proyektil Frangible Bebas Timbal

Proyektil pada dasarnya adalah material atau objek yang diluncurkan untuk mengenai target yang telah ditentukan. Pada penelitian ini, proyektil didefinisikan sebagai bagian dari peluru yang meluncur di udara dan mengenai target akibat transfer energi dari energi kimia hasil reaksi pembakaran serbuk mesiu.



**Gambar 2.1.** Bagian-bagian dari peluru  
(tinctuc.vietgiaitri.com)

Menurut Sporting Arms and Ammunition Manufacturers Institute (SAAMI) pada tahun 2001, ada tiga macam proyektil yang umum diproduksi dan dipasarkan, yaitu *lead bullet*, *partially jacketed bullet*, dan *full metal jacket*.

*Lead bullet* merupakan proyektil dengan bahan utama timbal. Logam timbal lunak sehingga mudah dicetak menjadi peluru. Logam timbal juga memiliki massa jenis tinggi sehingga memiliki energi kinetik tinggi sebagai proyektil, cocok untuk kebutuhan menembus perisai (*armor*).

*Partially jacketed bullet*, atau juga umum dikenal sebagai *half jacketed bullet* adalah peluru yang proyektilnya diselubungi sebagian oleh logam atau material lunak seperti tembaga atau polimer. Bagian proyektil yang tidak tertutup oleh material



selubung (*jacket*) adalah bagian pucuk (*tip*) dari proyektil yang menumbuk target.

*Full metal jacket*, adalah peluru yang seluruh proyektilnya diselimuti logam lunak, sebagai contoh tembaga. Tujuan dari pemberian selimut logam atau *jacket* adalah untuk menghindari abrasi pada laras senapan akibat gesekan dengan proyektil keras dan meningkatkan penetrasi (kemampuan menembus) peluru (Carlucci, 2012).

Penggunaan timbal sebagai bahan utama peluru memiliki kerugian signifikan. Menurut Davis (2001) timbal bersifat racun dan penembak dapat terpapar lewat uap pembakaran peluru maupun serpihan penembakan. Timbal juga menjadi polutan karena sifat racunnya, terutama menjadi polutan bagi tanah dan cadangan air tanah. Peluru timbal juga merugikan pada penggunaan tertentu ditinjau dari aspek fisik. Peluru keras dengan penetrasi besar dapat menimbulkan kerusakan pada instalasi latihan menembak, yang tidak membutuhkan penetrasi peluru yang dalam.

Para produsen peluru pun mengupayakan solusi atas dua masalah ini. Salah satu solusi utama adalah pembuatan proyektil frangible bebas timbal. Sifat frangible, material pecah pada saat tumbukan dengan material keras, menjadi solusi untuk meminimalkan kerusakan pada instalasi latihan menembak ataupun di medan baku tembak dalam ruangan. Bahan baku proyektil frangible yang digunakan umumnya adalah bahan metal dengan densitas tinggi nontimbal, seperti tembaga atau logam tungsten.





**Gambar 2.2.** Amunisi Glaser Blue® *safety slug*  
(<http://www.firearmsid.com>)

Salah satu generasi pertama proyektil frangible adalah Glaser® *safety slug* dengan konstruksi umum cangkang peluru yang diisi birdshot (isi dari amunisi shotgun untuk berburu burung, serupa dengan gotri mini) dan ditutup oleh “topi” polimer di bagian pucuknya. Dibandingkan dengan amunisi biasa, amunisi Glaser® berharga lebih mahal dan kurang akurat (Hash, 2011).

Pada tahun-tahun berikutnya, terutama sejak tahun 1990-an, inovasi bahan baku amunisi frangible terfokus pada metode produksi kompaksi dan sintering serbuk logam, dengan bahan pengikat serbuk logam dengan titik leleh lebih rendah (Benini, 2000), polimer (Belanger, 1992), maupun keramik (Hash, 2011).

Pada tahun 1997, Divisi Senjata Ringan, Direktorat Pengujian Persenjataan dan Amunisi, Pusat Tes Aberdeen, Angkatan Darat Amerika Serikat, menguji beragam amunisi *frangible*, terutama dengan pengikat polimer. Hasil yang didapatkan adalah peluru *frangible* tidak cocok dalam penggunaan operasional pada senjata api karena menghasilkan tekanan gas amunisi yang rendah, dipengaruhi oleh massa jenisnya yang rendah, dan kerentanannya untuk hancur di dalam senjata karena kekerasannya yang rendah.



Secara umum densitas dari peluru *frangible* menurut Hansen (2008) harus memiliki densitas dengan kisaran  $1,75\text{--}8,25\text{ g/cm}^3$ . Sedangkan untuk peluru *frangible* yang sesuai dengan karakteristik uji tembak memiliki densitas dengan kisaran  $7,1\text{--}8,5\text{ g/cm}^3$ . Pada penelitian yang dilakukan oleh S. Kruachatturat dkk (2009) menyebutkan bahwa kekuatan tekan yang harus dimiliki oleh peluru *frangible* berada pada kisaran 31 – 310 MPa, dengan nilai kekerasan permukaan pada kisaran 54 – 119 HV.

Firmansyah (2015) yang meneliti proyektil *frangible* komposit serbuk Cu-10% Sn mendapatkan bahwa peningkatan pada temperatur *sintering* mengakibatkan peningkatan pada sifat mekanik, terutama pada kekuatan tekan dan modulus elastisitas. Hal ini mengakibatkan ketahanan proyektil terhadap tumbukan meningkat dan *frangibility* proyektil menurun. Pada penelitiannya, Firmansyah mengemukakan bahwa temperatur *sintering* sebesar  $200^\circ\text{C}$  menghasilkan proyektil *frangible* paling optimal.

Anugraha (2015) yang meneliti proyektil *frangible* komposit serbuk Cu-Sn, mendapatkan bahwa faktor utama *frangibility* pada komposisi di atas adalah terbentuknya senyawa intermetalik. Pada temperatur *sintering*  $200\text{--}400^\circ\text{C}$  terbentuk senyawa intermetalik berupa  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  dan  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Sementara pada temperatur *sintering*  $500\text{--}600^\circ\text{C}$  terbentuk senyawa intermetalik berupa  $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$  dan  $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$ . Peningkatan temperatur *sintering* mengakibatkan perubahan porositas dan senyawa intermetalik yang terbentuk sehingga sifat mekanik mengalami peningkatan.

## **2.2. Bahan Baku Proyektil**

### **2.2.1. Timbal**

Timbal adalah unsur logam dengan symbol Pb dan nomor atom 82. Timbal adalah salah satu logam pertama yang digunakan secara luas oleh manusia karena temperatur lelehnya yang rendah sehingga mudah diekstraksi dan dibentuk. Penggunaan timbal pertama kali oleh manusia teridentifikasi di Catalhoyuk, Turki, pada 6400 SM (Heskel, 1983).



Menurut Davis (2001), timbal digunakan sebagai bahan baku peluru karena temperatur lelehnya dan kekerasannya yang rendah sehingga mudah dibentuk, dan massa jenisnya yang tinggi sehingga mampu mentransfer energi kinetik yang lebih besar pada target. Sayangnya, timbal memiliki efek negatif sebagai racun bagi makhluk hidup, terutama manusia. Menurut EPA (*USA Environmental Protection Agency*) bahaya utama yang ditimbulkan oleh timbal adalah sebagai racun otak, selain impotensi (Golub, 2005).

**Tabel 2. 1** Sifat Material Timbal (ASM volume 4)

Sifat	Keterangan
Struktur Kristal	FCC
Lattice (nm)	0,49489
Massa atom (g/mol)	207,19
Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	11,4
Titik leleh (°C)	327,4
Modulus Young (GPa)	21
Kekuatan tarik (MPa)	17
Koefisien muai (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	16.6

### 2.2.2. Tembaga

Tembaga adalah logam lunak dengan simbol Cu dan nomor atom 29. Tembaga, beserta emas dan perak berada pada grup 11, yang memiliki keuletan dan konduktivitas listrik yang tinggi. Penggunaan utama tembaga didasarkan pada sifat utamanya, yaitu konduktivitas listrik yang tinggi, yaitu sebagai kawat listrik dan peralatan yang memerlukan penghantaran listrik yang lain (Pops, 2008).

Berkebalikan dengan timbal, tembaga memiliki beberapa manfaat penting bagi banyak jenis makhluk hidup, mulai dari penyusun hemosianin, homolog hemoglobin bagi hewan moluska, tirosinase yang mengontrol produksi melanin di kulit, hingga plastosianin yang berfungsi penting dalam fotosintesis bagi tumbuhan (Berg dan Lippard, 1994)

**Tabel 2. 2.** Sifat Material Tembaga (ASM volume 4)

Sifat	Keterangan
Struktur Kristal	FCC
Lattice (nm)	0,3610
Massa atom (g/mol)	63,546
Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	8,933
Titik leleh (°C)	1084,62
Modulus Young (GPa)	110-128
Kekuatan tarik (MPa)	224
<i>Yield Strength (MPa)</i>	33.3
Koefisien muai (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	85

### 2.2.3. Poliamida-6

Poliamida-6, dengan sebutan lain nilon 6 atau polikaprolaktam, adalah polimer dalam keluarga poliamida (nilon). Polimer ini dikembangkan oleh Paul Schlack dari perusahaan IG Farben untuk menghasilkan material dengan sifat mekanik serupa dengan nilon 6,6 tanpa melanggar patennya (yang dimiliki perusahaan DuPont). Poliamida-6 terbentuk dari reaksi pembukaan cincin dari kaprolaktam. Reaksi ini berlangsung pada temperatur 533 K dalam atmosfer nitrogen inert selama 4-5 jam. Penggunaan umum poliamida-6 adalah sebagai roda gigi, bearing, serabut sikat gigi, hingga senar alat musik.

Menurut Belanger (1992) poliamida-6, dibandingkan dengan Nylon 11 maupun Nylon 12 memiliki titik lebur, densitas, penyusutan, dan pemekaran akibat kelembaban yang lebih tinggi. Sedangkan menurut Davis (2001) poliamida atau nylon 6 memiliki harga yang lebih rendah serta densitas dan frangibilitas (kecenderungan untuk pecah) lebih tinggi.

**Tabel 2. 3** Sifat Material Poliamida-6 (Honeywell)

Sifat	Keterangan
Kekerasan (Rockwell M)	85
Modulus elastisitas (MPa)	590-650



Densitas ( $\text{g/cm}^3$ )	1,13
Temperatur leleh ( $^{\circ}\text{C}$ )	220
Kekuatan tarik (MPa)	60-80

---

### 2.3. Komposit

Callister (2003) menyatakan bahwa komposit adalah gabungan dua material atau lebih terdiri dari matriks dan penguat (*reinforcement*). Daerah antarmuka matriks dan komposit disebut *interface*, dan bila terbentuk daerah ikatan antara penyusun komposit disebut sebagai *interphase*. Aspek penting, terutama bagi sifat mekanik komposit adalah optimasi daerah antara matriks dan penguat, baik itu *interface* maupun *interphase* (Schwartz, 1984).

Penghitungan massa matriks dan penguat dalam suatu komposit dapat dilakukan dengan menggunakan *Rule of Mixture (ROM)* yang dinyatakan dalam persamaan (2.1):

$$\rho_c = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

- $\rho_c$  = densitas komposit
- $\rho_m$  = densitas matriks
- $\rho_f$  = densitas penguat
- $V_m$  = fraksi volume matriks
- $V_f$  = fraksi volume penguat

Dengan menggunakan rumus densitas (2.2) dan memisalkan variabel maka akan bisa diperoleh fraksi massa.

$$\rho = \frac{m}{v} \dots\dots\dots (2.2)$$

Di mana:

- $\rho$  = densitas material
- $m$  = massa material
- $v$  = volum material

Permisalan:



$$\frac{m_m}{m_f} = \frac{a}{b} \text{ dan } \frac{\rho_m}{\rho_f} = \frac{x}{y}$$

Di mana:

$m_m$  = massa matriks

$m_f$  = massa penguat

$a$  = fraksi massa matriks

$b$  = fraksi massa penguat

$a+b$  = 100% = 1

maka:

$$\rho_m = \frac{m_m}{v_m}$$

$$v_m = \frac{m_m}{\rho_m} = \frac{a/b \cdot m_f}{x/y \cdot \rho_f} = \frac{a \cdot y \cdot m_f}{b \cdot x \cdot (m_f/v_f)}$$

$$v_m = \frac{a \cdot y}{b \cdot x} \cdot \frac{m_f}{m_f} \cdot v_f$$

$$\frac{v_m}{v_f} = \frac{a \cdot y}{b \cdot x}$$

Sehingga:

$$V_m = \frac{a \cdot y}{a \cdot y + b \cdot x} \text{ dan } V_f = \frac{b \cdot x}{a \cdot y + b \cdot x}$$

Jadi,

$$\rho_c = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f$$

$$\rho_c = x \cdot \frac{a \cdot y}{a \cdot y + b \cdot x} + y \cdot \frac{b \cdot x}{a \cdot y + b \cdot x}$$

$$\rho_c = \frac{axy + bxy}{a \cdot y + b \cdot x} = \frac{xy(a + b)}{ay + bx} = \frac{xy}{ay + bx}$$

$$\rho_c = \frac{m_c}{v_c} = \frac{xy}{ay + bx}$$



$$m_c = \frac{xy}{ay + bx} \cdot v_c$$

Dengan,

$$m_m = a \cdot m_c \text{ dan } m_f = b \cdot m_c$$

Maka, massa serbuk yang dibutuhkan untuk pembuatan komposit adalah

Massa matriks:

$$m_m = a \cdot \frac{xy}{ay + bx} \cdot v_c \dots\dots\dots (2.3)$$

Massa penguat:

$$m_f = b \cdot \frac{xy}{ay + bx} \cdot v_c \dots\dots\dots (2.4)$$

Komposit metal polimer, seperti definisi dari komposit di atas, adalah gabungan antara dua material atau lebih, dengan dua jenis yang berbeda yaitu logam dan polimer. Pada umumnya, logam menjadi penguat dari matriks polimer. Ada beragam manfaat inovatif dari pengembangan komposit metal modern saat ini, terutama dalam 20-30 tahun terakhir, sebagai contoh untuk pengembangan otot buatan (Shahinpoor et al, 1998), pengembangan katalis mengandung logam (Shter et al, 2007), hingga memunculkan komposit metal polimer mengandung logam mulia, seperti emas, yang memiliki keasaman tertentu (Behar-Levy et al, 2005).

Ada beragam cara pembuatan material komposit metal polimer. Salah satunya, seperti yang ditunjukkan oleh Nesher (2008), memiliki prinsip dasar reduksi kation metal di dalam larutan bakal polimer yang siap terpolimerisasi, sehingga logam terjebak di dalam polimer dalam dimensi yang sangat kecil.

## **2.4. Kompaksi dan Sintering**

### **2.4.1. Kompaksi**

Proses kompaksi adalah salah satu tahapan dalam proses pembuatan atau manufaktur dari material serbuk, seperti serbuk logam. Menurut German (1984), inti dari kompaksi adalah proses



pemadatan dan pemberiak ikatan mekanik antar serbuk dengan pemberian tekanan dari luar terhadap serbuk yang ditempatkan pada cetakan berbentuk benda jadi yang diinginkan. Tujuan dari kompaksi adalah untuk memperoleh densitas material yang tinggi.

Menurut Hirschhorn (1969) ada beberapa macam metode kompaksi menurut arah pemberian gaya, yaitu:

1. *Single action compaction*

Pada kompaksi jenis ini, tekanan hanya diberikan oleh pemukul (*punch*) atas, sedangkan *punch* bawah berguna sebagai penahan material serbuk. Setelah kompaksi, material didorong keluar oleh *punch* bawah.

2. *Double action compaction*

Kompaksi jenis ini berprinsip sama seperti *single action compaction*. Tetapi, kompaksi dilakukan oleh kedua *punch*. Pada kompaksi, *punch* bawah bergerak sedikit ke atas, memberikan tekanan tambahan pada material serbuk.

3. *Double action floating die compaction*

Pada kompaksi jenis ini, *punch* bawah tidak bergerak, menopang serbuk dalam cetakan (*die*) yang dapat bergerak ke atas dan ke bawah. Tekanan diberikan oleh *punch* atas. Bila gesekan antara serbuk dan dinding cetakan melebihi batas yang dimiliki cetakan, cetakan akan bergerak ke bawah mengikuti arah tekan *punch* atas, seolah-olah *punch* bawah menekan serbuk ke atas.

4. *Multiple motion compaction*

Kompaksi jenis ini memiliki *punch* majemuk dengan kedalaman penekanan berbeda, biasanya proses kompaksi ini digunakan untuk memproduksi benda kerja yang rumit.

5. *Multiple motion floating die withdrawal compaction*

Kompaksi jenis ini adalah gabungan dari proses *multiple motion compaction* dan *double action floating die compaction*.

Dalam proses kompaksi terjadi tahapan-tahapan sebagai berikut:

1. Penyesuaian letak partikel-partikel serbuk (*Rearrangement*)





Tahapan ini adalah tahapan awal yang terjadi pada saat kompaksi ketika penekanan mulai diberikan. Pada tahap ini mulai terjadi penyusunan kembali partikel-partikel akibat adanya penekanan sehingga partikel tersusun lebih padat. Gerakan penyusunan partikel ini dipengaruhi oleh adanya gaya gesek yang terjadi antar partikel, gaya gesek antara partikel serbuk dengan permukaan cetakan, dan gaya gesek antara partikel dengan permukaan *punch* (German, 1984).

#### 2. Deformasi elastis serbuk

Menurut German (1984), deformasi pada partikel serbuk akan mengurangi jumlah porositas di mana deformasi yang terjadi dapat berupa deformasi elastis maupun deformasi plastis. Deformasi dapat dikatakan elastis apabila setelah penekanan dihentikan, serbuk kembali ke bentuk semula. Deformasi elastis tampak pada saat massa serbuk dikeluarkan dari cetakan setelah proses kompaksi, massa serbuk sedikit mengembang terhadap volume cetakan.

#### 3. Deformasi plastis yang disertai dengan *mechanical interlocking* (saling mengunci antarpartikel).

Deformasi plastis adalah bagian terpenting dari mekanisme pemadatan selama proses kompaksi. Semakin tinggi tekanan yang kompaksi yang diberikan pada massa serbuk, maka derajat deformasi dan pemadatan yang dialami massa serbuk makin besar. Setelah melampaui besar pembebanan tertentu, derajat deformasi partikel-partikel serbuk melampaui batas deformasi elastisnya sehingga partikel-partikel tersebut mengalami deformasi plastis. Deformasi plastis inilah yang menyebabkan terjadi penguncian posisi antar partikel sehingga massa serbuk tidak mengalami disintegrasi setelah proses kompaksi. Pada saat terjadi deformasi plastis inilah perpindahan tegangan antar partikel berdekatan dan peningkatan nilai kekerasan massa serbuk juga terjadi (German, 1984).

#### 4. Penghancuran butir karena tekanan berlebih.

*Mechanical interlocking* terjadi bila ada kontak antar dua permukaan partikel material, terutama logam, pada tekanan tinggi



tanpa adanya gesekan maupun panas, sehingga muncul ikatan antar permukaan. Ikatan ini hanya dimungkinkan pada permukaan bersih. Pada partikel serbuk logam, permukaannya mengalami oksidasi karena reaktivitasnya yang tinggi sebagai partikel ukuran serbuk. Di bawah lapisan oksida tersebut terdapat permukaan logam yang terisolasi dan steril, sehingga *mechanical interlocking* yang ideal terjadi pada partikel serbuk yang mengalami penghancuran.

Penghancuran partikel serbuk juga menyebabkan porositas terisi oleh pecahan dari partikel serbuk yang hancur, sehingga densitas meningkat.

#### 2.4.2. Sintering

Sintering merupakan perlakuan panas pada material serbuk untuk menimbulkan ikatan antar partikel menjadi struktur koheren pada temperatur di bawah temperatur lebur salah satu komponen serbuk yang dominan. Mekanisme pembentukan struktur koheren melalui transport massa dalam skala atomik pada permukaan partikel serbuk.

Parameter proses sintering, seperti yang dikemukakan German (1984) adalah sebagai berikut:

1. Temperatur sintering yang mempengaruhi proses difusi.
2. Ukuran partikel serbuk, di mana semakin kecil ukuran serbuk maka pemadatan semakin cepat dan sempurna.
3. Waktu, juga mempengaruhi kesempurnaan difusi tetapi tidak seberpengaruh temperatur.
4. *Green density*, kepadatan partikel sebelum sintering yang kurang merata bisa menimbulkan keretakan (*crack*) selama sintering.
5. Tekanan kompaksi, di mana semakin besar tekanan kompaksi maka dislokasi partikel serbuk semakin banyak, sehingga sintering makin cepat. Selain itu, kompaksi yang besar meningkatkan *green density*.

Tahapan-tahapan proses yang terjadi selama sintering, menurut German (1984) adalah sebagai berikut:



### 1. Ikatan mula antar partikel (*point contact*)

Perpindahan atom melalui bidang kontak antar partikel, meliputi difusi atom yang mengarah pada pengembangan batas butir. Keberadaan pengotor di permukaan dapat menghalangi proses ini secara signifikan karena mengurangi luas permukaan antar partikel yang bersentuhan.

### 2. Pertumbuhan leher sebagai *intitial stage* (tahap awal)

Perpindahan massa lebih lanjut menimbulkan peningkatan luas permukaan kontak antar partikel serbuk, yang disebut sebagai pembentukan leher (*necking*). *Necking* membuat porositas (ruang antara partikel serbuk) terpisah. Pada tahap ini terjadi penyusutan dan pemadatan massa sinter.

### 3. Pembulatan pori (*intermediate stage*)

Pada tahap ini, *necking* semakin meningkat sehingga pori membulat karena partikel makin menyatu.

### 4. Penyusutan dan pengasaran butir

Pada tahap lanjutan dari sintering ini, porositas yang berdekatan bergabung, membentuk porositas yang lebih besar. Karakteristik dari tahap ini adalah jumlah porositas menurun dengan ukuran porositas membesar.

## 2.5. Modulus Resilien

Modulus resilien adalah kemampuan suatu material untuk menyerap energi selama pembebanan elastis. Atau dengan kata lain energi yang mampu ditahan benda sebelum benda mengalami deformasi plastis. Pada kurva tegangan-regangan, besar modulus resilien adalah luas di bawah kurva di daerah elastis (Bauccio, 1993). Satuan modulus resilien adalah  $\text{J/mm}^3$ . Modulus resilien juga dapat dihitung dengan rumus (Bansal, 1996):

$$R = \frac{p^2}{2E}$$

Di mana  $p$  adalah *yield strength* dan  $E$  adalah modulus Young. Besar modulus resilien untuk poliamida 6 adalah  $3,051 \text{ MJ/mm}^3$  dan untuk tembaga adalah  $5,04 \text{ kJ/mm}^3$ .



## 2.6. Penelitian-penelitian Terkait

Berikut ini adalah beberapa riset yang telah dipatenkan mengenai pengembangan peluru *frangible*:

**Tabel 2.4.** Simpulan Beberapa Riset Terpaten mengenai  
*Amunisi Frangible*

Peneliti, Identitas Paten	Produk/tema	Bahan
<b>Snide et al. Variable Density Frangible Projectile US 4,603,637 Agustus 1986</b>	Peluru <i>frangible</i> komposit polimer-metal, susunan dibentuk dengan struktur <i>interfitting</i> berpola V ( <i>chevron</i> )	<i>Core</i> : Polimer=thermoplastic, disarankan polistiren untuk bagian bawah peluru; PE, PP, PVC, PV asetat, PV alcohol, polibutilen untuk hidung ( <i>nose</i> ). Metal=logam densitas tinggi, masih menyertakan Pb dalam opsi (Pb, Pb oxide, Fe, Fe oxide, Cu, dst)
<b>George Davis, John R. Balmer Jacketed Frangible Bullets US 2001/0050020 A1 Desember 2001</b>	Peluru berproyektil <i>frangible</i> dengan jaket. <i>Core</i> pada ujung depan (penumbuk) tanpa jaket, sehingga jaket bisa ikut pecah saat menumbuk target keras akibat <i>shock transfer</i> oleh proyektil <i>frangible</i> .	<i>Core</i> (proyektil): campuran nylon, powder Cu, powder W (dapat menggunakan polimer termoplastik tipe lain, diutamakan poliamida, poliester, dan poliurethane, dengan campuran serbuk logam densitas tinggi lainnya, terutama Zn, Sn, W, Cu). Core density 6.0



**Calero Martinez et al.**  
**Frangible Bullets and Its Manufacturing Method**  
**US 8,365,672 B2**  
**Februari 2013**

Proyektil *frangible* tanpa jaket, diproduksi dengan kompaksi yang dibantu pelumas polimer sehingga densitas mencapai di atas  $6.9 \text{ gr/cm}^3$ .

Jaket:

Cu, ditinjau dari keuletan dan densitas yang tinggi  
(Alternatif: mild steel, atau polimer yang tahan temperatur *barrel*)

*Core:*

Serbuk logam berbasis Cu seperti perunggu atau kuningan, sebagai contoh kuningan serbuk 84%Cu, 6%Zn, 9%Sn. Ditekan dengan bantuan pelumas polimer, disarankan HDPE yang teroksidasi sebagian, kadar pelumas di bawah 1% total massa. Ukuran serbuk di atas 120 mikron.

*Core:*

Serbuk metal tembaga (Cu) dan serbuk kaca. Diameter rerata serbuk Cu 104 mikron. Diameter rerata serbuk kaca (pada contoh) 44 mikron. Rerata diameter dianjurkan kurang dari 100 mikron. Cu dipilih karena densitasnya yang tinggi dengan harga relatif murah.

Serbuk Cu dapat diganti

**Hash et al.**  
**Frangible, Ceramic-metal Composite Objects and Methods of Making the Same**  
**US 8,028,626 B2**  
**Oktober 2011**

Campuran *frangible* dengan komposisi fase primer metal dan fase sekunder keramik, dapat diaplikasikan sebagai proyektil.

Serbuk metal dan keramik dicampur hingga homogen dan dipadatkan, membentuk



---

	jaringan matriks. Kegetasan yang memicu frangibilitas muncul karena fasa keramik yang melingkupi fasa metal.	dengan serbuk Fe. Persentase kadar keramik dalam campuran 5-20%.
<b>Powers, Jr. Frangible Powdered Iron Projectiles US 7,685,942 B1 Maret 2010</b>	Proyektil <i>frangible</i> dengan kandungan mayoritas besi dengan campuran tembaga dan timah, di mana memiliki sensasi tembak ( <i>feel</i> ) dan sifat balistik setara proyektil timbal dengan kaliber dan ukuran sama, namun memiliki sifat <i>frangible</i> .	<i>Core:</i> Serbuk Fe, dapat diberi jaket dengan bahan alumunium, tembaga, kuningan, seng ataupun dengan bahan polymer, LDPE disarankan.
<b>Benini Frangible Metal Bullets, Ammunition, and Method of Making Such Articles US 6,090,178 July 2000</b>	Proyektil <i>frangible</i> , dua fasa: metal dan binder metal atau metalloid, membentuk intermetalik, tetap padat saat penembakan dan pecah saat menumbuk.	<i>Core:</i> Campuran copper-tin, persentase sekitar 90/10. Tin membentuk intermetalik dengan copper yang getas, menyebabkan material menjadi <i>frangible</i> .
<b>Williams</b>	Proyektil <i>frangible</i>	1. <i>Frangible</i>

---



<b>Method and Apparatus for Frangible Projectiles</b> <b>US 6,799,518 B1</b> <b>October 2004</b>	dengan serbuk <i>fluorescent</i> atau optikal untuk mendeteksi target maupun serbuk inert untuk mencegah ledakan material eksplosif di area penembakan, ataupun penyisipan batang penetrator untuk menembus armor	mengandung penanda optik /fluorescent yang tidak terdeteksi mata telanjang, digunakan sebagai penanda target, misalnya untuk artileri. 2. <i>Frangible</i> mengandung material aktif berdiameter di atas 0,15 mm seperti Si, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , dan sebagainya yang pada saat bertumbukan dengan wadah yang mengandung material eksplosif, mengekspos material aktif, bereaksi dengan udara, mencegah/mengurangi udara bereaksi dengan bahan eksplosif, mengurangi kekuatan ledakan ataupun menghindari ledakan . <i>Nose:</i> Busa polimer kaku <i>frangible</i> (disarankan poliuretan), densitas 128-224 kg/m <sup>3</sup> <i>Body:</i> Polikarbonat
<b>Kapeles et al.</b> <b>Frangible Non-lethal Projectile</b> <b>US</b> <b>2005/0066849</b> <b>A1</b> <b>Maret 2005</b>	Peluru nonletal, hidung <i>frangible</i> , munisi berongga bermuatan <i>marker</i> , gas air mata, zat kimia pelumpuh atau material nonlethal lainnya. Tujuan utama untuk	



**Williams et al.  
Method and  
Apparatus for  
Self-Destruct  
Frangible  
Projectiles  
US 7,380,503 B2  
Juni 2008**

pengendalian massa. Energi tumbukan didesain untuk menimbulkan memar namun bukan luka serius/fatal. Proyektil didesain dapat diluncurkan dari beragam senjata api pada target manusia.

Proyektil *frangible* dengan detonator pada desain untuk memungkinkan proyektil meledak tepat sebelum menembus target ataupun pada waktu yang telah diatur. Fokus pada bagian hidung proyektil yang tersusun dari komponen-komponen yang dikompaksi dingin.

*Nose:*

Penguat berupa W, Ta, dan WC.

Matriks berupa Sn, Al, BI, Cu, Zn, dan PTFE.

Matriks dan penguat dapat tersusun dari lebih dari satu komposisi.

Serbuk primer berukuran 25-1000 mikron. Serbuk binder tidak dirinci.

Komponen lain yaitu komponen aktif yang ditempatkan pada rongga di tengah proyektil ataupun dicampur pada *nose* sesuai spesifikasi komponen aktif. Komponen aktif dapat berupa penanda target,





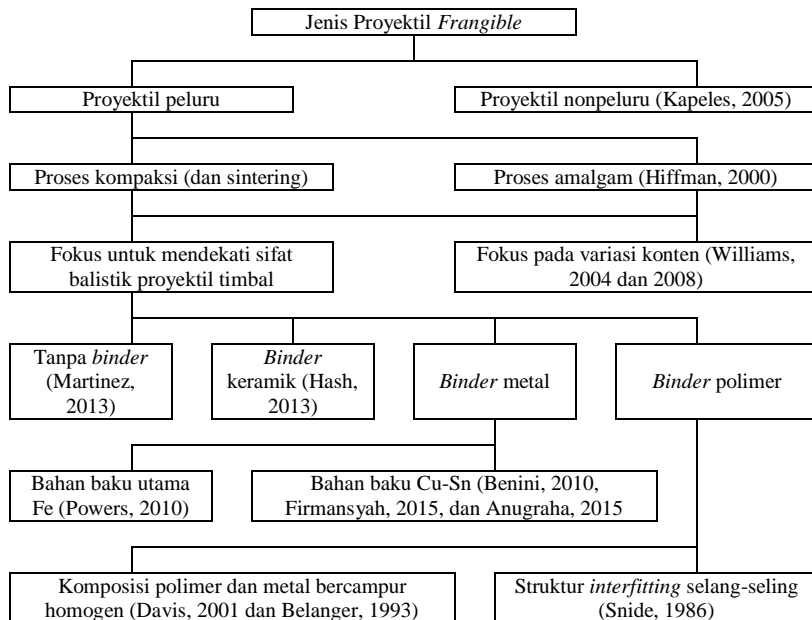
---

<b>Huffman Process Making Obstacle Piercing Frangible Bullet US 6,115,894 September 2000</b>	<b>of</b>	Peluru <i>frangible</i> berprinsip amalgam, yaitu larutan padat air raksa dengan powder metal. Terbentuk pada temperatur ruangan, karena serbuk logam yang dicampurkan pada air raksa langsung mengentalkan dan memadatkan air raksa.	penembus armor, maupun bahan lain.
			<i>Core:</i> Amalgam gigi, komposisi ideal pada (a) 40-60% Hg, 25-40% Ag, 15-25% Sn, 5% Cu, 2% Zn dan (b) 55-70% Hg, 15-45% Cd, 0-25% Sn, 0-2% Cu, 0-1% Zn. Ukuran serbuk metal yang dilarutkan dalam Hg paling besar 100 mesh. Aplikasi utama untuk medan perang.
<b>Belanger Frangible Practice Ammunition US 5,237,930 Agustus 1993</b>		Peluru <i>frangible</i> untuk aplikasi latihan berbahan baku serbuk Cu di atas 90% dengan pengikat serbuk Nylon 11. Ukuran serbuk Cu 200 mesh, ukuran serbuk nylon 11 44 mikron ke bawah. Pencampuran dengan metode <i>injectionmolding</i> .	Peluru <i>frangible</i> bermassa jenis 5,7 g/cm <sup>3</sup> . Massa proyektil kaliber 5,56 mm 36 grain dan massa proyektil 9 mm 85 grain. Densitas 5,7 g/cm <sup>3</sup> adalah densitas minimal untuk mendapatkan proyektil dengan sifat balistik terbaik.

---



Maka, inovasi-inovasi dengan paten tersebut digolongkan dalam bagan berikut.



**Gambar 2.3.** Diagram penggolongan tipe-tipe proyektil *frangible* inovasi terkait.

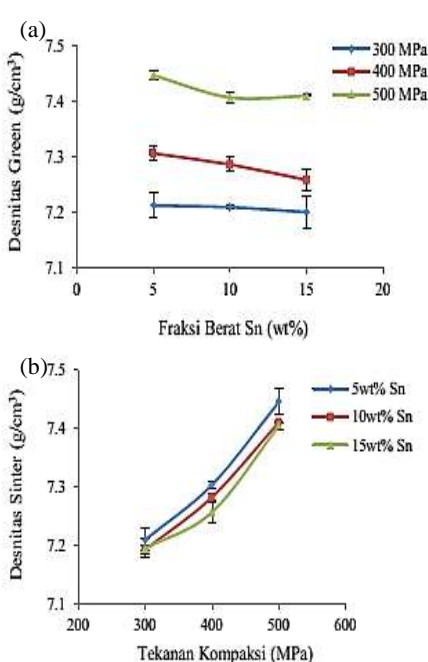


Dari literatur-literatur riset nonpaten, dapat ditarik informasi-informasi penting sebagai berikut:

**Tabel 2.5.** Simpulan Beberapa Riset Nonpaten mengenai Amunisi *Frangible*

Riset	Proses	Hasil								
<b>Banovic (2007)</b>	Proyektil <i>frangible</i> untuk menguji body armor. Proyektil dibuat dengan proses metalurgi serbuk dengan bahan baku Cu-Sn 90:10 persen berat. Pemanasan pada temperatur 260°C selama 30 menit dalam lingkungan gas nitrogen.	<b>Tabel 2.6.</b> Nilai kekerasan dari peluru <i>frangible</i> Cu-Sn (Banovic, 2007) <table><tr><th>Spesimen</th><th>Kekerasan (HRB)</th></tr><tr><td>1</td><td>22,9</td></tr><tr><td>2</td><td>21,6</td></tr><tr><td>3</td><td>22,4</td></tr></table>	Spesimen	Kekerasan (HRB)	1	22,9	2	21,6	3	22,4
Spesimen	Kekerasan (HRB)									
1	22,9									
2	21,6									
3	22,4									
<b>Kruachatturat (2009)</b>	Variabel: Komposisi serbuk Cu-Sn (95:5, 90:10, dan 85:15 persen berat) dan temperatur sintering (800, 850, dan 900°C). Pemanasan selama 45 menit dalam	Variabel dengan hasil paling optimal pada perbandingan komposisi serbuk 90:10 persen berat Cu-Sn dengan temperatur sintering 800°C. nilai kekuatan tekan 49-214 MPa, di dalam rentang peluru <i>frangible</i> komersial 31-310 MPa.								



<b>Vicko (2014)</b>	lingkungan gas hidrogen. Variabel: Komposisi serbuk Cu-Sn (95:5, dan 90:10 persen berat) dan tekanan kompaksi 300, 400 dan 500 MPa.	 <p>(a)</p> <table><caption>Data for Graph (a): Green Density vs. Sn Weight Fraction</caption><tr><th>Fraksi Berat Sn (wt%)</th><th>300 MPa (g/cm³)</th><th>400 MPa (g/cm³)</th><th>500 MPa (g/cm³)</th></tr><tr><td>5</td><td>~7.21</td><td>~7.31</td><td>~7.45</td></tr><tr><td>10</td><td>~7.21</td><td>~7.29</td><td>~7.41</td></tr><tr><td>15</td><td>~7.20</td><td>~7.26</td><td>~7.41</td></tr></table> <p>(b)</p> <table><caption>Data for Graph (b): Sinter Density vs. Compaction Pressure</caption><tr><th>Tekanan Kompaksi (MPa)</th><th>5wt% Sn (g/cm³)</th><th>10wt% Sn (g/cm³)</th><th>15wt% Sn (g/cm³)</th></tr><tr><td>300</td><td>~7.21</td><td>~7.20</td><td>~7.19</td></tr><tr><td>400</td><td>~7.30</td><td>~7.28</td><td>~7.25</td></tr><tr><td>500</td><td>~7.45</td><td>~7.42</td><td>~7.40</td></tr></table>	Fraksi Berat Sn (wt%)	300 MPa (g/cm³)	400 MPa (g/cm³)	500 MPa (g/cm³)	5	~7.21	~7.31	~7.45	10	~7.21	~7.29	~7.41	15	~7.20	~7.26	~7.41	Tekanan Kompaksi (MPa)	5wt% Sn (g/cm³)	10wt% Sn (g/cm³)	15wt% Sn (g/cm³)	300	~7.21	~7.20	~7.19	400	~7.30	~7.28	~7.25	500	~7.45	~7.42	~7.40
Fraksi Berat Sn (wt%)	300 MPa (g/cm³)	400 MPa (g/cm³)	500 MPa (g/cm³)																															
5	~7.21	~7.31	~7.45																															
10	~7.21	~7.29	~7.41																															
15	~7.20	~7.26	~7.41																															
Tekanan Kompaksi (MPa)	5wt% Sn (g/cm³)	10wt% Sn (g/cm³)	15wt% Sn (g/cm³)																															
300	~7.21	~7.20	~7.19																															
400	~7.30	~7.28	~7.25																															
500	~7.45	~7.42	~7.40																															
<b>Paiman (2014)</b>	Komposisi serbuk Cu-Sn 90:10 persen berat. Variabel: Temperatur sintering (300, 500, dan 700°C) dan waktu tahan	Hasil utama yang diamati adalah pembentukan fase intermetalik pada daerah antarmuka ( <i>interface</i> ) partikel serbuk, yaitu Cu <sub>3</sub> Sn, Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub> , Cu <sub>10</sub> Sn <sub>3</sub> , Cu <sub>41</sub> Sn <sub>11</sub> , dan Cu <sub>81</sub> Sn <sub>21</sub> . Menurut hasil penelitian, temperatur sintering 500°C dan waktu tahan 60 menit menghasilkan																																

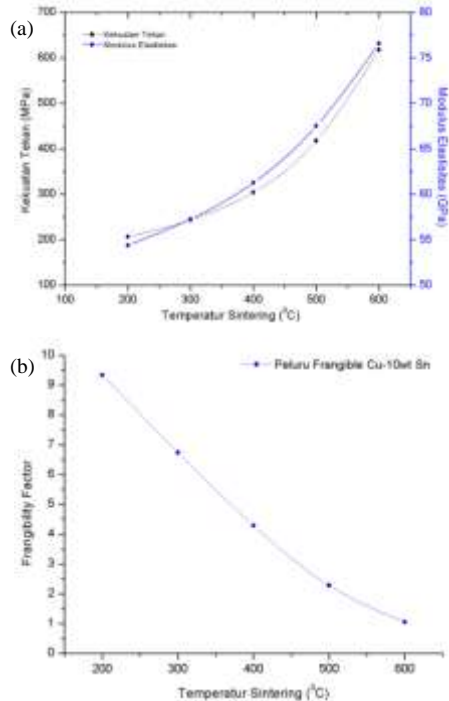


**Firmansyah (2015)**

sintering (30, 60, dan 90 menit)

Komposisi Cu-10% wt Sn, kompaksi 600 MPa selama 5 menit, sintering pada variabel 200, 300, 400, 500, dan 600°C selama 30 menit.

proyektil paling optimal untuk aplikasi *frangible*.

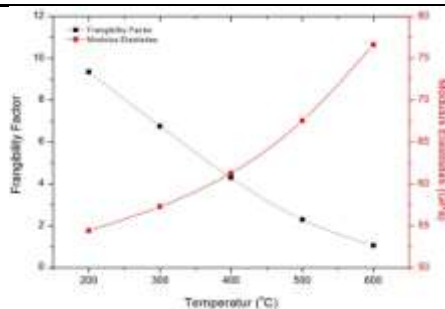


**Gambar 2.5.** Pengaruh temperatur sintering terhadap (a) kekuatan tekan dan modulus elastisitas dan (b) *frangibility factor* proyektil

Kesimpulannya, peningkatan temperatur sintering menurunkan *frangibility* proyektil.



**Anugraha (2015)** Komposisi Cu-10% wt Sn, kompaksi 600 MPa, sintering pada variabel 200, 300, 400, 500, dan 600°C selama 30 menit.



**Gambar 2.6.** Perbandingan antara *frangibility factor* dan modulus elastisitas terhadap temperatur sintering proyektil Cu-10% wt Sn.

Kesimpulannya adalah penyebab dari turunnya *frangibility* dari proyektil Cu-10% wt Sn adalah peningkatan sifat mekanik proyektil.

Beberapa penelitian utama yang menjadi dasar pertimbangan dalam pemilihan bahan baku untuk penelitian ini adalah:

1. Martinez (2013) membuat proyektil dengan komposisi 84% Cu, 6% Zn dan 9% Sn dalam bentuk serbuk metal berukuran lebih dari 120 mikron (batas maksimal ukuran serbuk tidak dirinci). Serbuk dikompaksi dengan pelumas serbuk HDPE 0,6%, dengan densitas pascakompaksi (*green density*) 7,2-7,5 g/cm<sup>3</sup> dan dipanaskan pada temperatur di bawah 400°C untuk membentuk oksida logam di permukaan serbuk dan oksida polimer antar partikel serbuk sebagai pengikat massa proyektil. Proyektil menghasilkan pecahan pascatembak berukuran massa 2,5 grain (1 grain = 0,065 gram) dari standar 5 grain. Lolos uji balistik internal maupun eksternal.



2. Belanger (1992) membuat proyektil *frangible* Cu-Nylon 11 dan Nylon 12 dengan metode *injection molding*. Proyektil berdensitas  $5,7 \text{ g/cm}^3$ , dengan komposisi Cu 92-93%. Nilai proyektil ini dipilih karena berdasarkan hasil riset oleh Belanger, kadar Cu di bawah 90 persen dari campuran menghasilkan densitas yang rendah, sedangkan kadar Cu di atas 95 persen memberikan perekatan yang rendah dan menimbulkan disintegrasi proyektil di dalam laras yang dapat membahayakan penembak maupun senapan.
3. Firmansyah (2015) dan Anugraha (2015) menganalisa proyektil Cu-10% wt Sn. Kesimpulan yang didapatkan oleh mereka adalah temperatur sintering, terutama pada komposit metal-metal, meningkatkan nilai sifat mekanik proyektil, sehingga *frangibility* turun.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*





## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1. Bahan-bahan Percobaan**

##### **1. Serbuk Cu**

Serbuk tembaga hasil produksi Merck dengan spesifikasi:

Densitas	: $8,933 \text{ g/cm}^3$
Temperatur lebur	: $1084,62^\circ\text{C}$
Massa molekular	: $63,546 \text{ g/mol}$
Ukuran partikel	: $>230 \text{ mesh ASTM } (<63 \text{ mikron})$

##### **2. Serbuk Poliamida-6 (Nylon 6)**

Serbuk polimer dari PT Dutabudi Tulusrejo dengan spesifikasi:

Densitas	: $1,13 \text{ g/cm}^3$
Temperatur lebur	: $220^\circ\text{C}$
Ukuran partikel	: Rerata 100 mesh

##### **3. Pelumas**

Pelumas berfungsi untuk mengurangi gesekan antar serbuk maupun antara serbuk dan dinding cetakan pada saat kompaksi. Pelumas yang digunakan adalah *zinc stearate* dengan proporsi 1% massa campuran. *Zinc stearate* yang berupa serbuk memiliki spesifikasi:

Produsen	: Aldrich Chemistry
Densitas	: $1,09 \text{ g/cm}^3$
Temperatur lebur	: $128-130^\circ\text{C}$
Massa molekular	: 632,33

#### **3.2. Alat-alat Percobaan**

##### **1. Sieve**

Berfungsi untuk mengayak serbuk sehingga ukuran serbuk homogen.

##### **2. Neraca Analitik**



Berfungsi untuk mengukur massa bahan secara akurat, terutama dalam proses pencampuran bahan dan proses pengukuran densitas.

### 3. Alat Kompaksi

Berfungsi untuk memadatkan serbuk bahan baku menjadi bentuk spesimen uji sebelum dipanaskan (disinter).

### 4. *Dies* (Cetakan) Kompaksi

Berfungsi untuk memberi bentuk pada serbuk pada proses pemadatan(kompaksi) menjadi bentuk spesimen uji.

### 6. *Magnetic Stirrer* (Pengaduk Magnetik)

Berfungsi untuk menghasilkan persebaran komposit yang merata. Terdiri atas dua komponen, yaitu *hot plate* dan magnet pengaduk.

### 5. *Horizontal Tube Furnace*

Berfungsi untuk memanaskan spesimen uji hasil kompaksi.

### 6. *Combustion boat*

Berfungsi untuk menempatkan spesimen uji dalam *horizontal tube furnace* selama proses pemanasan/sintering.

### 7. Jangka Sorong

Digunakan untuk mengukur dimensi sampel pascakompaksi maupun pascapemanasan.

### 8. *X-ray Diffraction (XRD)*

Bertujuan untuk mengetahui material penyusun, fasa, dan struktur kristal yang ada pada komposit spesimen uji.

### 9. *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Bertujuan untuk mengetahui morfologi mikrostruktur spesimen uji, terutama porositas, *interface* antar partikel, dan sebagainya



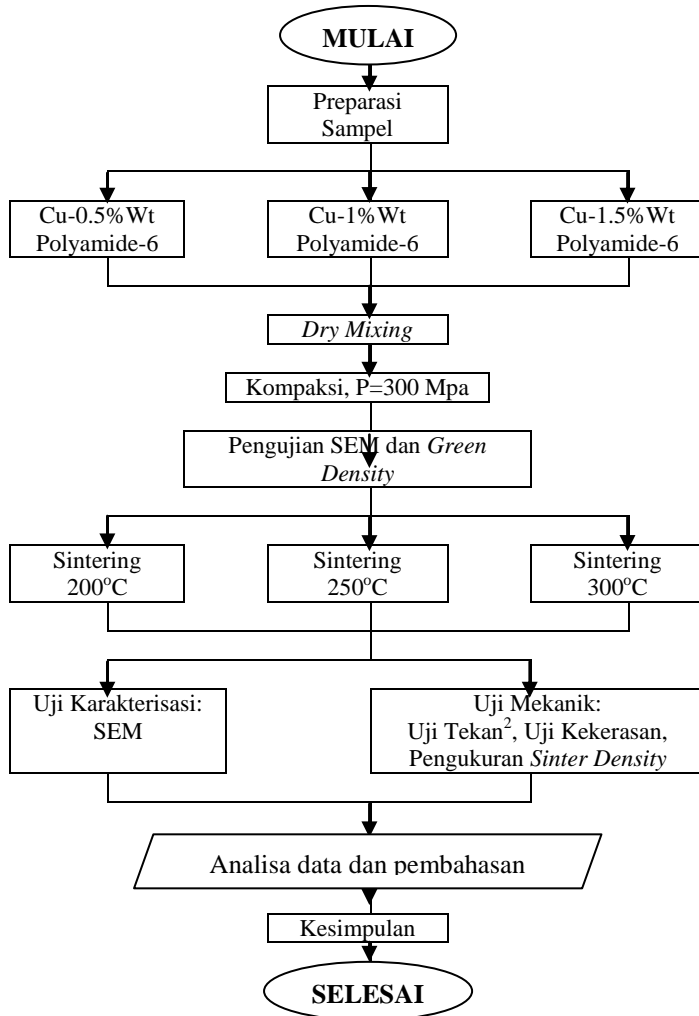
sehingga dapat dilakukan analisa berdasarkan kenampakan partikel komposit pascakompaksi dan pemanasan/sintering.

#### 10. Alat Uji Tekan

Bertujuan untuk mengetahui ketahanan sampel hasil kompaksi dan pemanasan terhadap pembebanan tekan, yang dapat dianalisa lebih lanjut menjadi modulus elastisitas.



### 3.3. Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian**



### 3.4. Pelaksanaan Penelitian

#### 3.4.1. Preparasi Sampel

Sebelum melakukan eksperimen ada dua tahapan penting dalam persiapan bahan:

##### 1. *Sieving*

Mengayak serbuk Cu dan serbuk poliamida-6 agar mendapatkan ukuran partikel serbuk yang homogen.

##### 2. Menentukan Perbandingan Massa

Menghitung massa serbuk Cu dan poliamida-6 yang diperlukan dalam satu spesimen. Dalam praktikum ini, perbandingan massa adalah variable manipulasi dengan nilai perbandingan massa Cu dengan poliamida-6 99,5:0,5; 99:1, dan 98,5:1,5. Adapun volume spesimen adalah  $2155,13 \text{ mm}^3$  atau dibulatkan menjadi  $2,16 \text{ cm}^3$

Persamaan dasar untuk perhitungan massa Cu dan poliamida-6 adalah:

$$m = \rho \cdot V \dots\dots\dots (3.1)$$

Di mana  $m$  adalah massa material,  $\rho$  adalah densitas, kerapatan, atau massa jenis material, dan  $V$  adalah volumen material. Persamaan perhitungan massa Cu dan poliamida-6 didapatkan melalui langkah-langkah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow m_{Cu} : m_{PA6} &= b : c \\ \Leftrightarrow (\rho_{Cu} \times a) : (\rho_{PA6} \times (2,16 - a)) &= b : c \\ \Leftrightarrow c(\rho_{Cu} \times a) &= b(\rho_{PA6} \times (2,16 - a)) \\ \Leftrightarrow c \cdot \rho_{Cu} \cdot a &= b(2,16 \cdot \rho_{PA6} - a \cdot \rho_{PA6}) \\ \Leftrightarrow c \cdot \rho_{Cu} \cdot a + b \cdot a \cdot \rho_{PA6} &= b \cdot 2,16 \cdot \rho_{PA6} \\ \Leftrightarrow a(\rho_{Cu} \cdot c + \rho_{PA6} \cdot b) &= b \cdot 2,16 \cdot \rho_{PA6} \\ \Leftrightarrow a &= \frac{b \cdot 2,16 \cdot \rho_{PA6}}{(\rho_{Cu} \cdot c + \rho_{PA6} \cdot b)} \\ \Leftrightarrow m_{Cu} &= \rho_{Cu} \cdot \frac{b \cdot 2,16 \cdot \rho_{PA6}}{(\rho_{Cu} \cdot c + \rho_{PA6} \cdot b)} \dots\dots\dots (3.2) \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow m_{PA6} = \rho_{PA6} \cdot (2,16 - a) \dots\dots\dots (3.3)$$



Keterangan:

- $a$  = volume serbuk Cu  
 $b$  = fraksi massa Cu (%)  
 $c$  = fraksi massa poliamida-6 (%)  
 $\rho_{Cu}$  = densitas Cu ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $\rho_{PA6}$  = densitas poliamida-6 ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $2,16$  = volume spesimen ( $\text{cm}^3$ )  
 $m_{Cu}$  = massa serbuk tembaga (g)  
 $m_{PA6}$  = massa serbuk poliamida-6 (g)

Dari volume Cu, volume poliamida-6 dan kemudian massa Cu dan poliamida-6 dapat dicari. Maka, nilai massa bahan-bahan tersebut adalah:

**Tabel 3.1.** Nilai Massa Cu dan Poliamida-6 Berdasarkan Perbandingan Massa

Spesimen (% wt poliamida-6)	Massa Cu (g)	Massa Poliamida-6 (g)
0.5	18.06938	0.1825
1	18.6653	0.0938
1.5	17.50484	0.2666

Maka, dengan jumlah spesimen per variabel 4 buah, dan tiga variabel temperatur sintering, maka total spesimen per variabel persen berat adalah 12 buah spesimen, dengan jumlah massa total untuk variabel 0,5% massa polimer 224 g serbuk Cu dan 1,2 g serbuk poliamida-6, untuk variabel 1% massa polimer 217 g serbuk Cu dan 2,2 g serbuk poliamida-6, serta untuk variabel 1,5% massa polimer 211 g serbuk Cu dan 3,2 g serbuk poliamida-6.

### 3.4.2. *Mixing*

*Mixing* adalah proses pencampuran material-material penyusun komposit material serbuk agar material-material tersebut tersebar merata (homogen) dalam campuran material.



Pada penelitian ini *mixing* dilakukan dengan *magnetic stirrer* selama 45 menit. *Mixing* dilakukan per variabel persen massa polimer.

### 3.4.3. Kompaksi

Kompaksi dilakukan untuk membentuk spesimen dari material serbuk. Kompaksi dilakukan pada tekanan 300 MPa. Tahapan proses kompaksi adalah sebagai berikut:

1. Menimbang massa campuran serbuk hasil *mixing* sesuai massa per spesimen. Massa per spesimen tergantung pada variabel persen berat polimer (poliamida-6).
2. Memasukkan campuran serbuk ke *dies* (cetakan) kompaksi. Dimensi *dies* untuk spesimen uji mekanik komposit proyektil adalah 14 mm untuk diameter dan 14 mm untuk tinggi spesimen.
3. Memberikan tekanan pada campuran serbuk dalam *dies*. Tekanan dipertahankan (*hold*) selama 5 menit.
4. Menimbang densitas prasintering (*green density*). *Green density* dihitung dengan mengukur massa hasil kompaksi dengan neraca analitik dan volume hasil kompaksi dengan jangka sorong.

### 3.4.4. Sintering

Sintering dilakukan dengan *horizontal tube furnace*. Tahapan dari sintering adalah:

1. Menempatkan spesimen hasil kompaksi pada *combustion boat* sebelum dimasukkan dalam *horizontal tube furnace*.
2. Melakukan proses sintering dengan memanaskan spesimen pada variabel temperatur 200, 250, dan 300°C dan dalam waktu 30 menit.
3. Melakukan pengujian-pengujian untuk mengetahui sifat-sifat spesimen.



### 3.4.5. Pengujian

Pengujian-pengujian dalam penelitian ini adalah pengujian densitas sintering, pengujian kekerasan, pengujian kompaksi, pengujian XRD, dan pengujian SEM.

#### a) Pengujian densitas sintering

Pengukuran densitas spesimen pascasintering menggunakan metode Archimedes dengan tahapan sebagai berikut:

1. Menimbang massa sampel di udara dengan neraca analitik.
2. Menimbang massa sampel di dalam air dengan rancangan Archimedes.
3. Menghitung volume spesimen.
4. Menghitung densitas spesimen pascasinter.

Perhitungan densitas menggunakan persamaan 3.4 sebagai berikut:

$$\Leftrightarrow V = \frac{(m_D - m_s)}{\rho_{H_2O}}$$
$$\Leftrightarrow \rho = \frac{m_D}{(m_D - m_s) / \rho_{H_2O}} \dots\dots\dots(3.4)$$

Keterangan:

- $\rho$  = Sinter Density ( $\text{g/cm}^3$ )
- $m_s$  = massa basah di air (g)
- $m_D$  = massa kering (g)
- $V$  = Volume ( $\text{cm}^3$ )
- $\rho_{H_2O}$  = massa jenis air =  $1 \text{ g/cm}^3$

#### b) Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan standar Rockwell

B. Pengujian dilakukan dengan alat kompaksi universal. Tahapan metode pengujian adalah:

1. Meratakan permukaan uji tekan dengan pengamplasan.
2. Memasang indentor Rockwell B.
3. Meletakkan sampel uji pada tempat sampel (*holder*).
4. Menjalankan alat uji kekerasan.
5. Mencatat nilai kekerasan yang tertera pada layar.

#### c) Pengujian kompaksi





Pengujian kompaksi dilakukan untuk mengetahui kekuatan komposit proyektil sekaligus mencari modulus elastisitas dari komposit dari nilai kekuatan tekan. Proses pengujian tekan adalah:

1. Meratakan permukaan atas dan bawah spesimen agar tekanan yang diterima spesimen merata dan hasil pengujian akurat.
2. Meletakkan sampel pada alat uji tekan.
3. Menjalankan proses uji tekan hingga spesimen mengalami deformasi.
4. Mencatat dan menganalisa hasil uji tekan untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas.

Hubungan antara modulus elastisitas dan kekuatan material diteliti oleh Nematzadeh pada tahun 2012 dan diperoleh kesimpulan seperti persamaan 2.5 yang tercantum berikut, di mana hasil yang didapatkan dari persamaan tersebut mendekati hasil eksperimen.

$$E = 22000 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$$

Dengan:

- E = modulus elastisitas (GPa)  
f<sub>cm</sub> = kekuatan tekan (MPa)

#### d) Pengujian XRD

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui komposisi bahan baku. Alat XRD yang digunakan produksi dari X'pert PANalytical. Tahapan pengujian XRD adalah sebagai berikut:

1. Meletakkan sampel pada *holder*. Dimensi maksimum sampel 10 mm, maka sampel menggunakan pecahan uji tekan.
2. Meletakkan *holder* pada alat XRD dan menjalankan proses XRD.
3. Menganalisa hasil XRD yang dicetak oleh unit komputer XRD.



Untuk menganalisa hasil XRD dapat menggunakan software Match<sup>®</sup> ataupun kartu JCPDF atau ICDD.

e) Pengujian SEM

Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) dilakukan untuk mengetahui morfologi spesimen, terutama interaksi antar metal dan polimer. Alat SEM yang digunakan adalah SEM FEI 150. Tahapan dari proses pengujian SEM adalah:

1. Mempersiapkan sampel uji.
2. Membersihkan sampel uji dan menempatkan sampel pada *holder* dengan menempelkan dengan *carbon tape*.
3. Memasukkan sampel dalam SEM.
4. Menganalisa hasil SEM.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## **BAB IV**

### **ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1. Analisa Data**

##### **4.1.1. Proses Pembuatan Komposit Cu-Poliamida (Cu-PA)**

Pada penelitian ini spesimen terbuat dari bahan baku komposit tembaga (Cu) dan poliamida (PA) dengan variabel komposisi 0.5, 1.0, dan 1.5% poliamida. Didapatkan massa untuk komposit 0.5% poliamida adalah 18.6653 gram Cu dan 0.0938 gram poliamida, massa untuk komposit 1.0% poliamida adalah 18.0694 gram Cu dan 0.1825 gram poliamida, dan massa untuk komposit 1.5% poliamida adalah 17.5048 gram Cu dan 0.2666 gram poliamida.

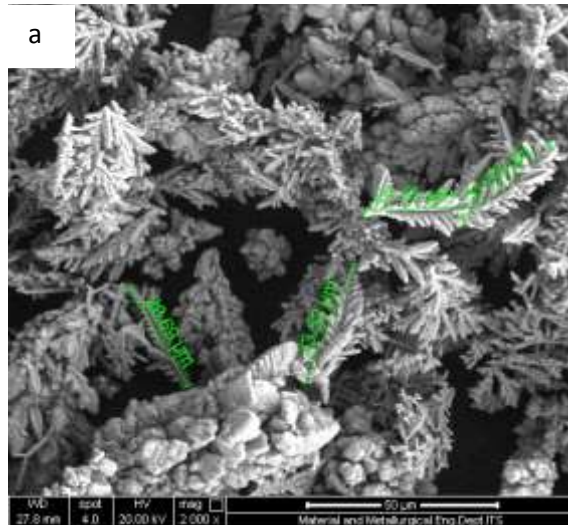


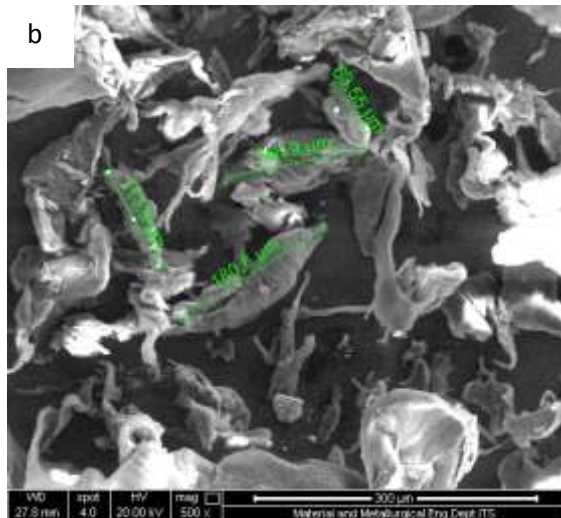
**Gambar 4.1.** a) Serbuk Tembaga, b) Serbuk Poliamida-6, c) serbuk zinc stearate d) serbuk hasil mixing sebagai bahan baku spesimen.



Secara fisik serbuk tembaga berwarna kemerahan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1.a. Tembaga dihipotesiskan berfungsi sebagai matriks yang mempengaruhi sifat komposit secara signifikan. Pada Gambar 4.1.c tampak serbuk campuran antara tembaga dan poliamida tidak menunjukkan perbedaan warna dari serbuk tembaga sebelum pencampuran. Hal ini dikarenakan oleh tidak adanya reaksi kimia antara tembaga dan poliamida dan jumlah poliamida yang minim dalam komposit.

Dari pengamatan SEM, serbuk tembaga terdiri atas dua penampakan bentuk utama, yang pertama adalah bentuk dendritik, yang kedua adalah bentuk agregat partikel seperti yang tampak pada Gambar 4.2.a. Kisaran ukuran butir adalah 27.55 mm hingga 33.52 mm. Sedangkan serbuk poliamida-6 berbentuk cenderung tidak massauran, tetapi sebagian besar butir berbentuk memanjang seperti yang tampak pada Gambar 4.2.b dengan kisaran ukuran 63.55 hingga 180 mikron.



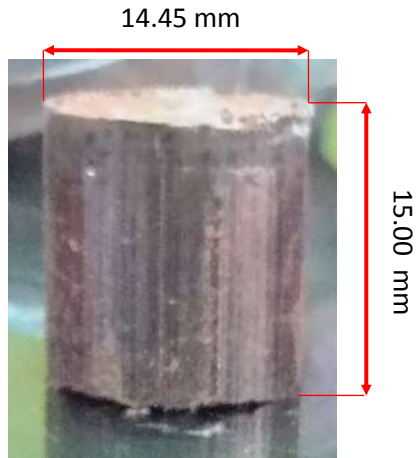


**Gambar 4.2.** a) Foto SEM serbuk tembaga dan hasil pengukurannya, perbesaran 2000x, b) Foto SEM serbuk poliamida dan hasil pengukurannya, *coating* emas, perbesaran 500x.

Setelah dilakukan *mixing* per spesimen antara tembaga dan poliamida, dilakukan kompaksi dengan tekanan 300 MPa untuk membentuk spesimen *pellet* untuk dilakukan uji mekanik. Kompaksi dilakukan di laboratorium jurusan Teknik Sipil, ITS. Kompaksi difasilitasi dengan penambahan *zinc stearate* di dinding cetakan spesimen agar mempermudah pergerakan partikel spesimen dan mempermudah pengeluaran specimen dari cetakan pascakompaksi. Pada proses kompaksi terjadi interaksi antarpartikel, yaitu kohesi yang terjadi antarpartikel sejenis yaitu tembaga dengan tembaga dan poliamida dengan poliamida, serta adhesi antarpartikel yang berbeda. Menurut German (1984) pada awal kompaksi terjadi penyesuaian posisi partikel sehingga porositas yang tersisa mencapai nilai minimal. Pada tekanan yang lebih besar akan terjadi deformasi elastis untuk mengisi porositas lebih lanjut, yang bila kompaksi berlanjut deformasi tersebut dipermanenkan menjadi deformasi plastis. Pada tekanan yang jauh

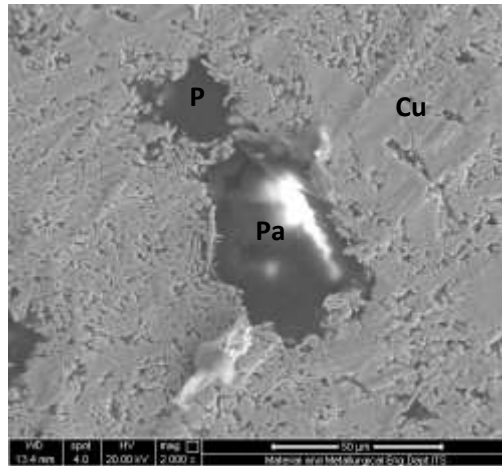


lebih tinggi akan terjadi *mechanical interlocking* sehingga terjadi penguncian antarpartikel dan spesimen menjadi semi-solid. Sebanyak 27 spesimen dibuat dalam proses kompaksi ini, dengan spesimen per variabel (per temperatur dan per persen poliamida) sebanyak tiga spesimen.



**Gambar 4.3.** Spesimen pascakompaksi, dengan dimensinya.

Setelah kompaksi, mikrostruktur spesimen diamati melalui pengamatan SEM (*scanning electron microscopy*), satu specimen setiap kombinasi variabel (temperatur sinterring dan persen poliamida).



**Gambar 4.4.** Foto SEM terhadap spesimen produk kompaksi, Cu: tembaga, PA: poliamida, P: porositas. Perbesaran 2000x.

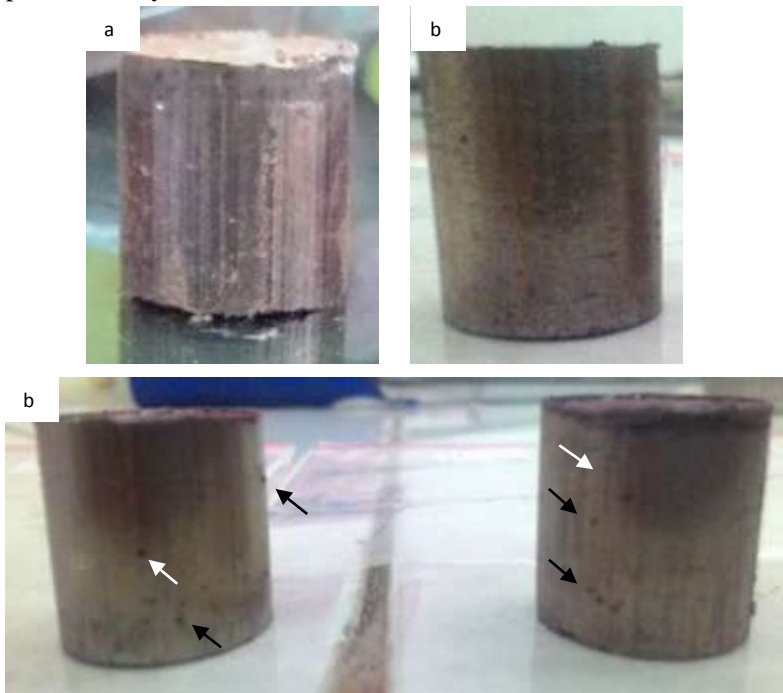
Pada Gambar 4.4 tampak penampakan foto SEM terhadap spesimen hasil kompaksi, sebelum sintering. Dari foto tersebut terbukti bahwa butir serbuk mengalami deformasi plastis dan *interlocking* akibat dari tekanan yang besar selama kompaksi. Tampak juga butir poliamida yang cukup besar bila dibandingkan dengan serbuk tembaga dan porositas yang dapat dibagi menjadi dua golongan: porositas besar yang muncul di sekitar butir poliamida dan porositas kecil atau permukaan yang tampak cukup merata di permukaan specimen. Penampakan umum dari porositas adalah memiliki dasar yang lebih gelap dan tanpa kesan transparan seperti kaca. Sedangkan penampakan celah berpoliamida adalah dasarnya memiliki penampakan transparan seperti kaca atau memiliki pantulan cahaya.

Selain pengambilan foto SEM, sebelum disinter dilakukan pengukuran *green density* (kerapatan/densitas prasinter). Pengukuran dilakukan dengan mengukur massa specimen dan membaginya dengan volume specimen yang dihitung dengan rumus volume silinder. Setelah itu, dilakukan sintering pada specimen dengan variabel temperatur 200, 250, dan 300°C. Pada





proses sintering selama sintering terjadi difusi atom, yaitu pergerakan atom ke porositas maupun melewati bidang kontak antarpartikel yang memperkuat ikatan antarbutir dan mengurangi porositas pada komposit (German, 1984). Sintering dilakukan pada atmosfer vakum untuk menghindari oksidasi pada tembaga. Spesimen hasil kompaksi dapat dilihat pada Gambar 4.5. Sebagian besar specimen pascasintering memiliki warna lebih keperakan dibandingkan dengan specimen prasintering. Selain itu, beberapa specimen pascasintering memiliki noktah hitam pada permukaannya.



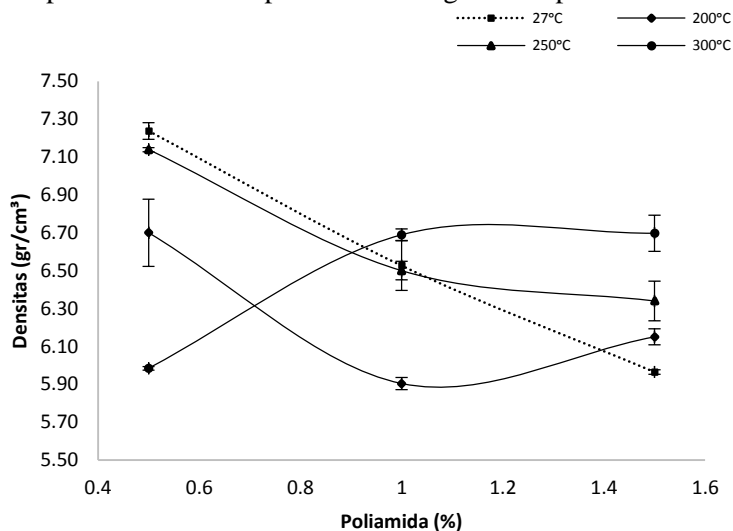
**Gambar 4.5.** Perbandingan specimen pascasintering dan specimen prasintering (a) Spesimen prasintering, (b) Spesimen pascasintering, (c) Spesimen pascasintering dengan noktah hitam (lihat panah)



Kemudian, dilakukan pengukuran densitas pascasinter dengan metode Archimedes, pengamatan permukaan specimen melalui penfotoan SEM, dan pengujian tekan untuk mengetahui kekuatan specimen.

#### 4.1.2. Hasil Analisa Densitas dan Porositas Komposit Tembaga-Poliamida

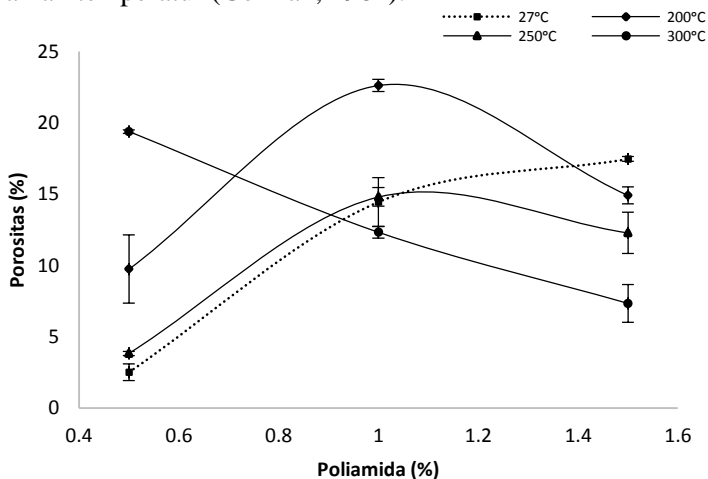
Densitas, dan antitesisnya yaitu porositas, secara teori memiliki pengaruh signifikan terhadap kekuatan bahan. Suatu material komposit hasil sintering akan semakin kuat bila partikel penyusunnya tersebar homogen, yang ditandai dengan densitas relatif yang tinggi, dan dengan demikian porositas yang rendah. Dalam penelitian ini, dianalisis hubungan antara densitas dan porositas specimen dengan kedua variabel penelitian yaitu persen massa poliamida dan temperatur sintering dalam specimen.



**Gambar 4.6.** Pengaruh persen massa poliamida dalam specimen terhadap densitas specimen.



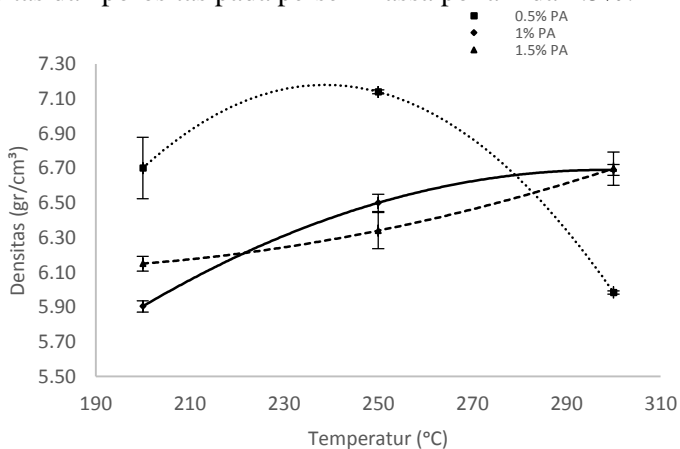
Pada Gambar 4.6. terlihat hubungan antara persen massa poliamida spesimen dan densitas spesimen. Pada spesimen yang belum disinter, hubungan secara umum adalah perbandingan terbalik, sesuai dengan dasar teori, di mana semakin besar persen massa poliamida dalam komposit maka massa jenis komposit akan berkurang. Namun, setelah diberi perlakuan sintering, terjadi perubahan pada respon densitas terhadap persen massa poliamida, bahkan beberapa perubahan yang terjadi sangat drastis. Pada variabel temperatur 250°C, kurva tetap memperlihatkan hubungan berbanding terbalik meskipun dengan kemiringan yang lebih landai daripada spesimen prasinter. Sementara itu, spesimen dengan variabel temperatur 200°C menunjukkan penurunan di awal sebelum mengalami kenaikan densitas pada persen massa poliamida 1.5%. spesimen dengan variabel temperatur sinter 300°C malah mengalami kenaikan drastis dari persen massa poliamida 0.5% ke 1%, dan kenaikan landai pada persen massa poliamida 1.5%. Secara teori, kenaikan densitas pada proses sintering disebabkan oleh difusi atom menuju porositas pada kenaikan temperatur (German, 1984).



**Gambar 4.7.** Pengaruh persen massa poliamida dalam spesimen terhadap porositas spesimen



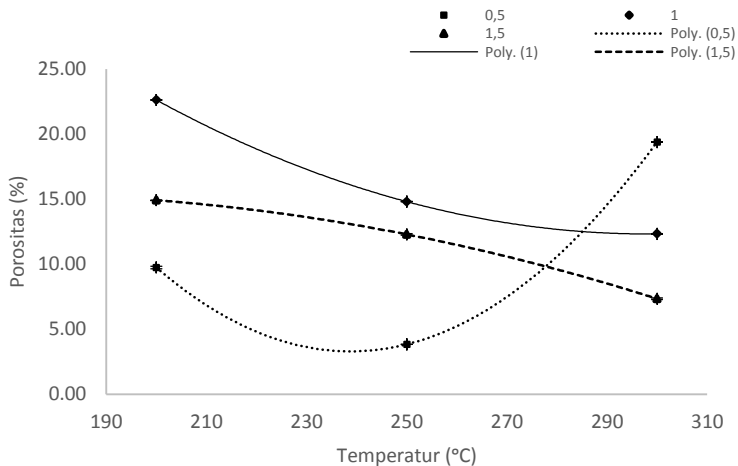
Pada Gambar 4.7, tampak hubungan antara persen massa poliamida dalam persen dengan porositas spesimen. Secara umum, pada rentang persen massa poliamida 0.5-1% terjadi peningkatan porositas, kecuali pada variabel 300°C. Pada komposisi 1.5% poliamida, semua variabel kecuali variabel tanpa sinter (27°C) mengalami penurunan porositas, sedangkan spesimen tanpa sinter mengalami kenaikan porositas. Dapat disimpulkan, spesimen tanpa sinter mengalami kenaikan porositas yang konsisten, spesimen variabel temperatur sinter 300°C mengalami penurunan porositas yang cukup konstan, dan spesimen dengan variabel temperatur sintering 200 dan 250°C mengalami kenaikan porositas di awal, lalu penurunan porositas pada persen massa poliamida 1.5%. Terlihat juga dari perbandingan kurva antara hubungan persen massa poliamida dengan densitas dan persen massa poliamida dengan porositas semua variabel temperatur memperlihatkan hubungan yang berbanding terbalik, kecuali variabel temperatur sintering 250°C yang mengalami penurunan densitas dan porositas pada persen massa poliamida 1.5%.



**Gambar 4.8.** Pengaruh temperatur sintering terhadap densitas spesimen.



Pada Gambar 4.8. tampak pengaruh temperatur terhadap densitas sinter spesimen. Spesimen dengan variabel persen massa poliamida 1 dan 1.5% mengalami peningkatan nilai densitas seiring dengan kenaikan temperatur. Spesimen dengan persen massa poliamida 0.5% mengalami penurunan densitas yang signifikan pada temperatur 350°C. Anomali yang ditunjukkan oleh kurva persen massa poliamida 0.5% yaitu penurunan densitas pada temperatur 300°C menjelaskan penyimpangan kurva persen massa poliamida 0.5% pada Gambar 4.6 dan 4.7.



**Gambar 4.9.** Pengaruh temperatur sintering terhadap porositas spesimen.



Gambar 4.9 menunjukkan hubungan antara temperatur sintering spesimen terhadap porositas spesimen, di mana temperatur ruangan yang menunjukkan keadaan awal sebelum sintering juga ditampilkan dalam grafik. Secara umum kurva yang ditunjukkan oleh setiap variabel persen massa poliamida adalah kebalikan dari kurva yang ditunjukkan oleh variabel yang sama pada Gambar 4.8. Hal ini sesuai dengan teori yang dikemukakan oleh German (1984) di mana porositas memiliki hubungan terbalik dengan densitas, karena bila porositas menurun maka komposit menjadi semakin padat, dan sebagai akibatnya densitas komposit meningkat.

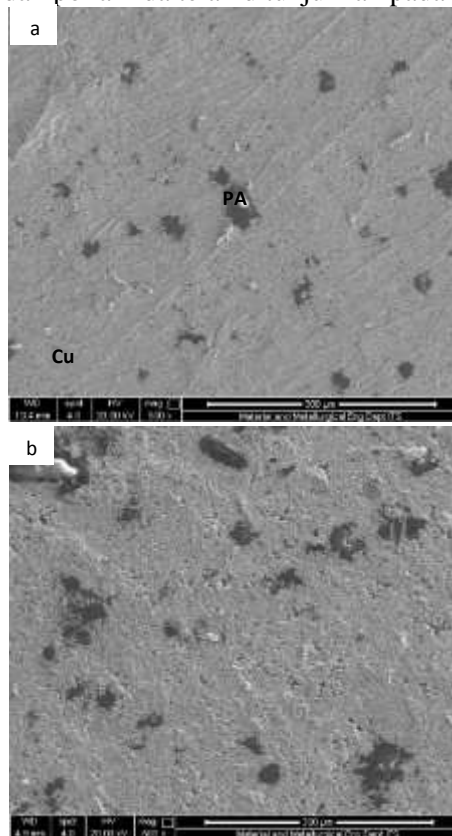
Dari pengukuran densitas dan porositas spesimen didapatkan data bahwa nilai densitas tertinggi diperoleh pada spesimen tanpa sinter dengan persen massa poliamida 0.5% sebesar  $7,24 \text{ gr/cm}^3$ . Densitas tertinggi pascasintering didapati pada temperatur sintering  $250^\circ\text{C}$  dan persen massa poliamida 0.5% sebesar  $7,14 \text{ gr/cm}^3$ . Densitas terendah didapati pada spesimen dengan temperatur sintering  $200^\circ\text{C}$  dan persen massa poliamida 1% sebesar  $5.90 \text{ gr/cm}^3$ . Sesuai dengan teori di mana porositas berbanding terbalik dengan densitas, nilai porositas tertinggi teramati pada spesimen dengan temperatur sintering  $200^\circ\text{C}$  dan persen massa poliamida 1% sebesar 22,63%. Nilai densitas terendah teramati pada spesimen tanpa sinter dengan persen massa poliamida 0.5% sebesar 2,51%, dan nilai densitas pascasintering terendah teramati pada spesimen dengan temperatur sintering  $250^\circ\text{C}$  dan persen massa poliamida 0.5% sebesar 3,83%.

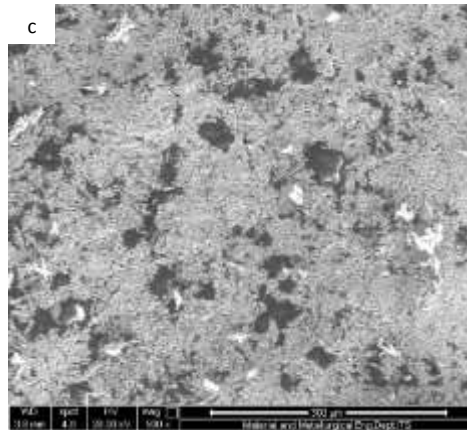
#### 4.1.3. Hasil Analisa Morfologi SEM

Pada penelitian ini dilakukan pengamatan mikrostruktur dengan menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM) untuk mengamati lebih rinci permukaan spesimen yang diamati. Adapun pengamatan mikrostruktur dengan SEM adalah bahan baku serbuk tembaga dan poliamida, spesimen pascakompaksi, spesimen pascasintering, dan patahan spesimen pascasintering. Pengamatan



SEM bahan baku dilakukan untuk mengetahui morfologi bahan baku sehingga dapat dilakukan analisa tentang proses kompaksi dan untuk mengukur dimensi butir serbuk bahan baku. Pengamatan SEM spesimen pascakompaksi dilakukan untuk mengetahui distribusi poliamida dalam tembaga, distribusi porositas, dan keadaan interaksi antarbutir bahan baku sebagai hasil dari proses kompaksi. Pengamatan spesimen pascasintering dilakukan untuk mengetahui adanya perubahan distribusi poliamida di dalam tembaga maupun distribusi porositas pascasintering, serta keadaan interaksi antarbutir sebagai hasil dari sintering. Pengamatan mikrostruktur dengan SEM terhadap bahan baku tembaga dan poliamida telah ditunjukkan pada Gambar 4.2.





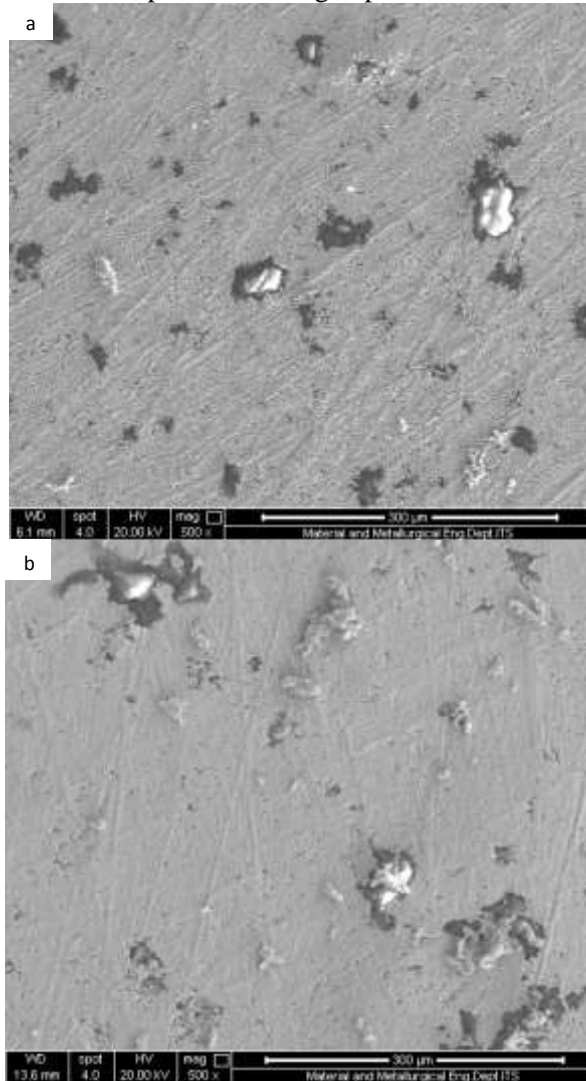
**Gambar 4.10.** Mikrostruktur spesimen pascakompaksi, sebelum disinter dengan persen massa poliamida (a) 0,5% (b) 1,0% dan (c) 1,5%. Perbesaran 500x

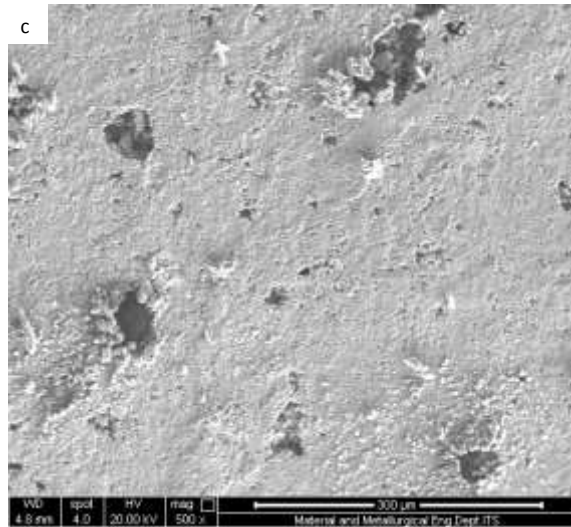
Pada Gambar 4.10 tampak permukaan spesimen pascakompaksi dengan komposisi poliamida 0.5, 1, dan 1.5%. Tampak dari foto mikrostruktur tersebut, seiring dengan peningkatan persen massa poliamida, poliamida makin tersebar merata di permukaan dan dalam spesimen. Pada mikrostruktur 0.5% memang tampak persebaran poliamida yang agak dekat dengan butir poliamida lainnya, sehingga kurang tersebar dalam matriks tembaga. Persebaran poliamida semakin baik pada persen massa poliamida 1% dan 1.5%. Porositas besar, pada Gambar 4.10 (a) tampak berada di sekitar atau dekat dengan keberadaan butir poliamida. Namun, Gambar 4.10 (b) dengan persen massa poliamida 1% menunjukkan bahwa porositas besar juga ada yang terbentuk menyebar, tidak dekat dengan butir poliamida. Gambar 4.10 (c) dari spesimen dengan persen massa poliamida 1.5% kembali menampilkan kecenderungan porositas terbentuk di



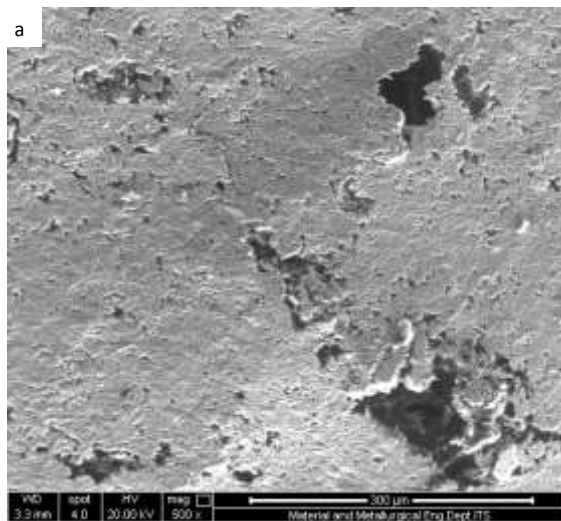


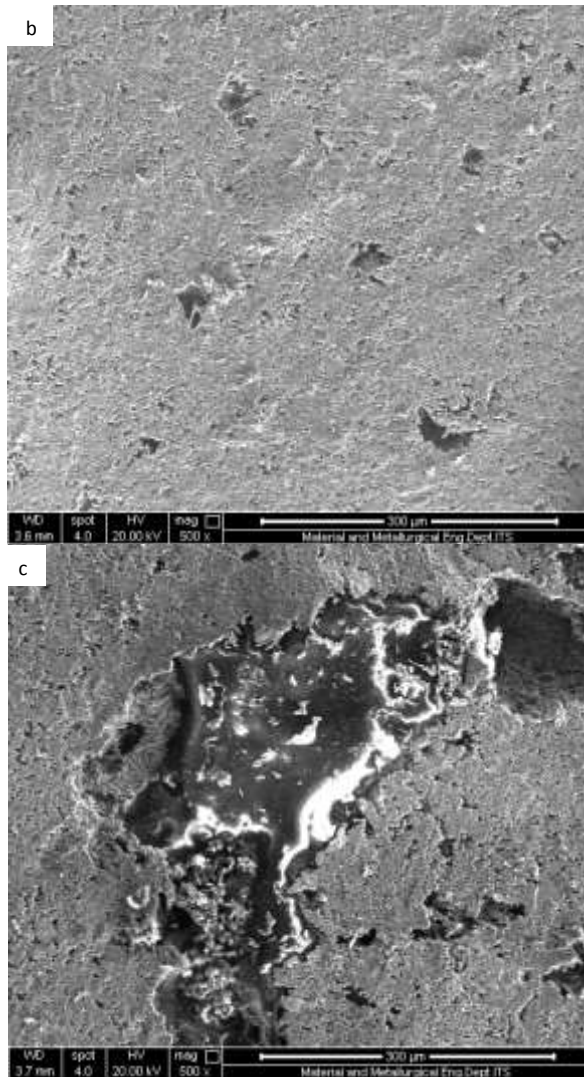
sekitar butir poliamida. Selain itu, tampak porositas juga muncul di batas antara butir poliamida dengan porositas.



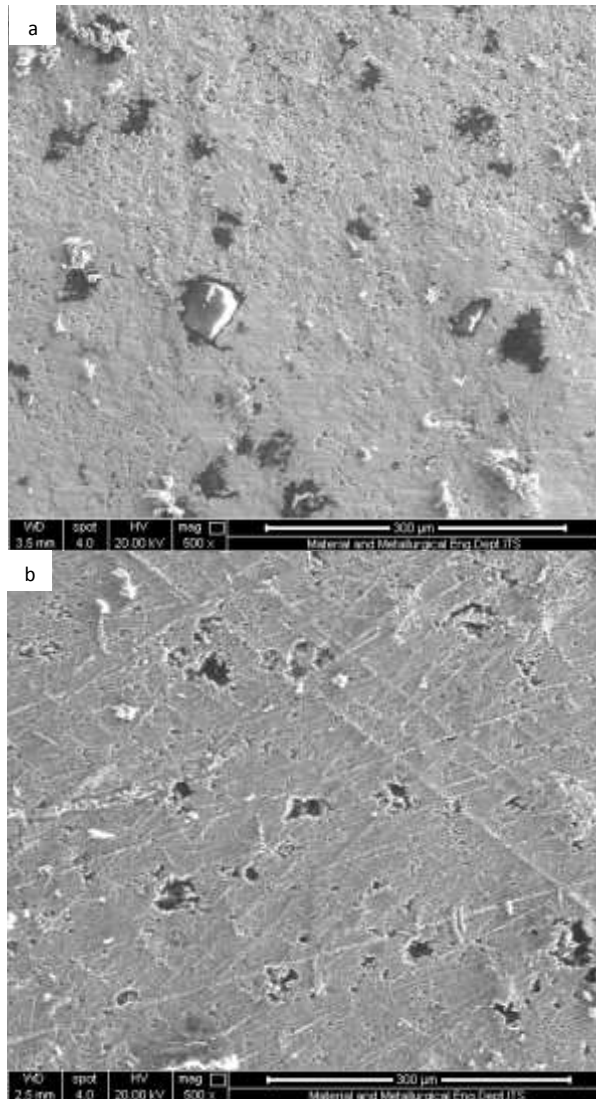


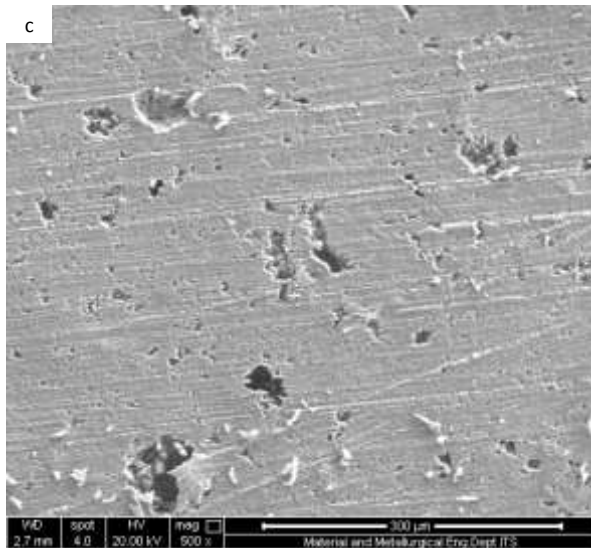
**Gambar 4.11.** Foto SEM spesimen pascasinter, komposisi 0.5%, temperatur (a)200°C, (b)250°C, dan (c)300°C. Perbesaran 500x.





**Gambar 4.12.** Foto SEM spesimen pascasinter, komposisi 1%, temperatur (a)200°C, (b)250°C, dan (c)300°C. Perbesaran 500x.



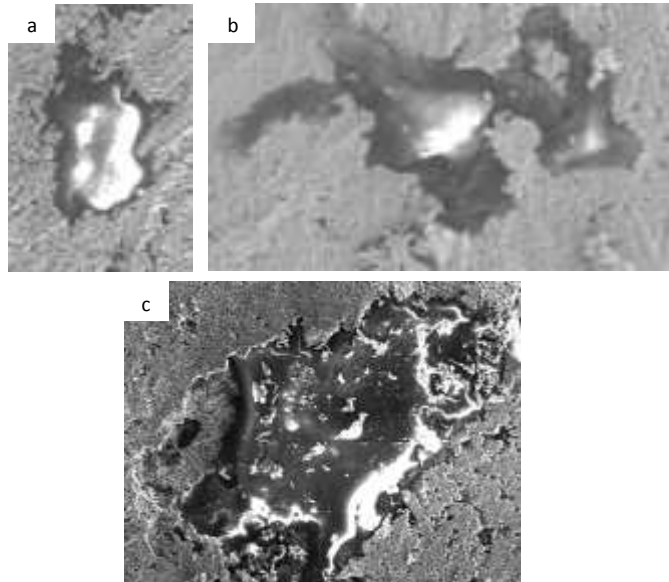


**Gambar 4.13.** Foto SEM spesimen pascasinter, komposisi 1.5%, temperatur (a) 200°C, (b) 250°C, dan (c) 300°C. Perbesaran 500x.

Dari Gambar 4.11, 4.12, dan 4.13 sebagai foto SEM dari spesimen pascakompaksi, tampak bila tidak terjadi perubahan mencolok pada butir tembaga sebagai matriks. Perubahan mencolok terjadi pada butir poliamida, di mana pada sebagian besar foto SEM butir poliamida tidak tampak di permukaan spesimen, terutama pada spesimen berpersen massa poliamida 1.5%, namun bila diamati lebih jelas beberapa foto memiliki poliamida yang masuk ke bagian dalam spesimen, yang bila dilihat dari atas tampak seperti porositas, seperti yang terlihat pada Gambar 4.11. (c) dan 4.12. (a). Porositas spesimen secara umum menurun, persebarannya cukup merata dengan kecenderungan terbentuk di sekitar butir poliamida. Pada Gambar 4.12 (c) tampak ada butir besar poliamida dengan luas 150x300 mikron. Dari hasil pengamatan SEM serbuk poliamida ukuran maksimal serbuk adalah panjang 180 mikron, maka disimpulkan



bahwa butir tersebut hasil penggabungan beberapa butir yang berdekatan.



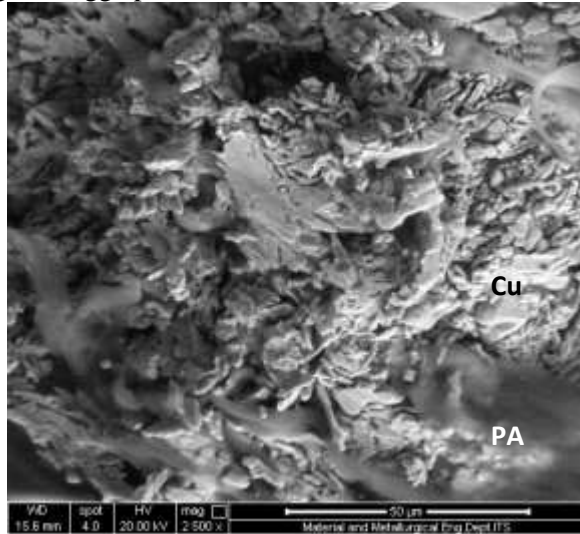
**Gambar 4.14.** Detail dari foto SEM spesimen persen massa poliamida 0.5% dan temperatur sinter 200°C (a), poliamida 0.5% dan temperatur sinter 250°C (b) dan poliamida 1% temperatur sinter 300°C (c).

Pada Gambar 4.14 tampak detail dari Gambar 4.11 dan 4.12 mengenai foto SEM pascasinter. Tampak di sini perbandingan respon butir poliamida terhadap kenaikan temperatur sintering. Pada temperatur 200°C, di bawah temperatur lebur poliamida (220°C), poliamida tampak menonjol dari matriks tembaga, dan batas butir poliamida sedikit mengikuti alur dari batas butir tembaga. Pada temperatur 250°C, poliamida tampak masuk ke dalam spesimen dan batas butir poliamida mulai mengikuti bentuk batas tembaga di sekelilingnya, meskipun tampak masih ada jeda atau porositas. Pada temperatur 300°C, tampak permukaan poliamida cenderung rata dengan matriks





tembaga, dengan batas butir poliamida mengikuti bentuk batas tembaga di sekelilingnya. Kemampuan butir poliamida untuk mengikuti bentuk batas butir tembaga semakin baik sebanding dengan naiknya temperatur disebabkan oleh viskositas butir poliamida yang menurun seiring dengan kenaikan temperatur sintering, sehingga poliamida semakin encer.



**Gambar 4.15.** Foto SEM dari patahan spesimen pascauji tekan, memperlihatkan poliamida (PA) dan tembaga (Cu). Poliamida 0.5%, temperatur 300°C.

Dari patahan poliamida pasca uji tekan dapat diamati mikrostruktur antara poliamida dan tembaga di dalam spesimen. Terlihat bahwa poliamida di dalam spesimen mengikat tembaga di sekitarnya, sehingga mampu menahan deformasi akibat tegangan dari luar. Dari gambar di atas juga tampak bahwa poliamida melingkupi tembaga dan minim jeda antara butir tembaga dan poliamida, hal ini membuktikan bahwa poliamida juga meleleh di dalam spesimen.

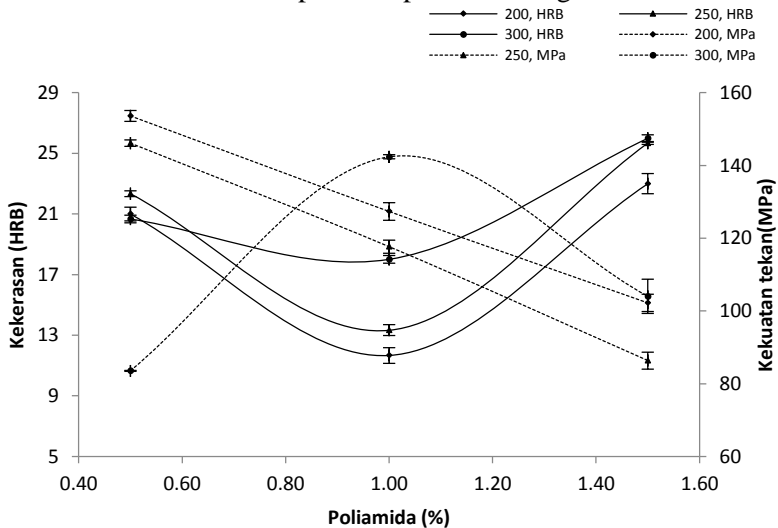
Sementara itu, dari gambar-gambar mikrostruktur di atas tampak bahwa antar butir tembaga tidak terjadi penyatuan



antarbutir tembaga seperti teori sintering German (1984) karena temperatur sintering yang jauh di bawah temperatur lebur tembaga yaitu pada 1084°C.

#### 4.1.4. Hasil Analisa Pengujian Mekanik

Dalam penelitian ini, sifat mekanik yang dianalisis adalah kekerasan dan kekuatan spesimen pascasintering.



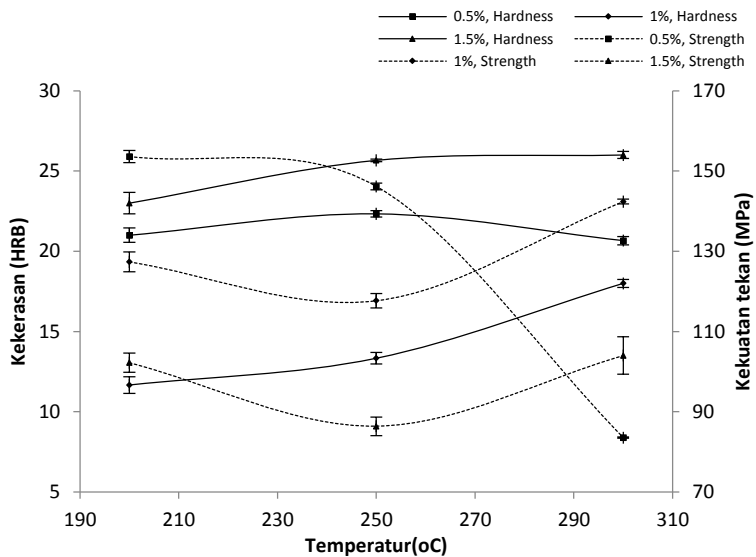
**Gambar 4.16.** Grafik hubungan antara persen massa poliamida dengan kekuatan tekan spesimen dan kekerasan spesimen.

Pada Gambar 4.16 tampak hubungan antara persen massa poliamida dengan kekuatan tekan spesimen maupun kekerasan spesimen. Untuk kekuatan tekan, semua variabel menunjukkan hubungan berbanding terbalik kecuali pada variabel temperatur 300°C, di mana kekuatan tekan meningkat dari persen massa poliamida 0.5% ke 1%. Sementara itu, untuk kekerasan semua variabel menunjukkan penurunan dari persen massa poliamida 0.5% ke 1%, kemudian meningkat dari 1% ke 1.5%. Bila





dihubungkan dengan grafik hubungan antara persen massa poliamida dengan densitas pada Gambar 4.6 maupun grafik hubungan antara persen massa poliamida dengan porositas spesimen pada Gambar 4.7, kekuatan tekan lebih memiliki kaitan dengan densitas spesimen. Kecenderungan penurunan densitas pada variabel temperatur sintering 200 dan 300°C seiring dengan penurunan kekuatan tekan pada kedua variabel tersebut. Sementara itu, grafik kekuatan tekan pada variabel 300°C hanya memiliki perbedaan pada rentang persen massa poliamida 1-1.5%, di mana keterkaitan juga dapat ditemui di rentang tersebut yaitu adanya perubahan kemiringan kurva. Yang menjadi anomali adalah kekuatan tekan spesimen variabel temperatur 200°C yang tetap turun pada persen massa poliamida 1.5%, sementara nilai densitas pada temperatur dan persen poliamida tersebut meningkat. Sementara itu, grafik kekerasan spesimen memiliki kaitan dengan grafik pengaruh persen poliamida terhadap porositas spesimen, di mana porositas berbanding terbalik dengan kekerasan spesimen. Pengecualian berlaku pada variabel temperatur sintering 300°C pada persen massa poliamida 0.5%-1%, di mana nilai porositas dan kekerasan sama-sama turun.



**Gambar 4.17.** Grafik hubungan antara temperatur sintering poliamida dengan kekuatan tekan spesimen dan kekerasan spesimen.

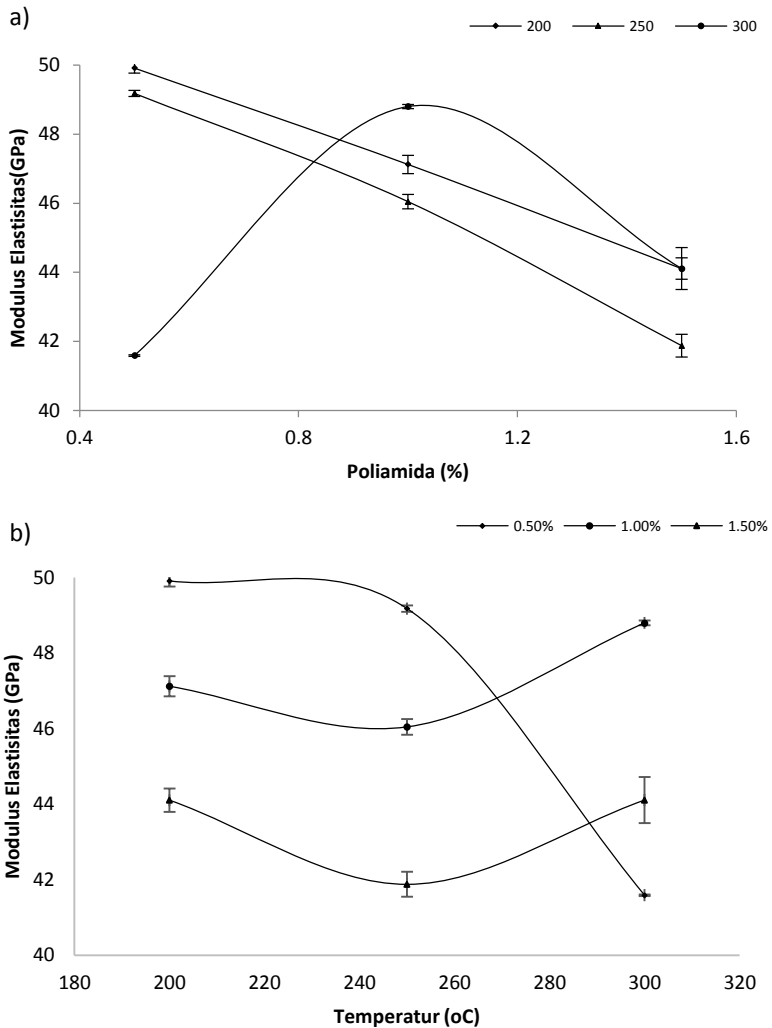
Pada Gambar 4.17 tampak hubungan antara temperatur sintering spesimen dengan kekuatan tekan dan kekerasan spesimen. Dari grafik terlihat bahwa nilai kekuatan tekan semua spesimen menurun pada temperatur 250°C, selanjutnya kekuatan tekan spesimen, kecuali spesimen dengan persen massa poliamida 1.5%, meningkat pada temperatur 300°C. Spesimen dengan persen massa poliamida 0.5% mengalami penurunan nilai kekuatan yang signifikan pada temperatur 300°C. Sedangkan nilai kekerasan spesimen cenderung meningkat seiring dengan peningkatan temperatur sintering, kecuali spesimen dengan persen massa poliamida 0.5% yang mengalami penurunan kekerasan pada temperatur 300°C. Secara umum, nilai kekerasan spesimen kurang peka terhadap perubahan temperatur, terlihat dari landainya kenaikan maupun penurunan yang ditampilkan oleh kurva, berbeda dari kenaikan ataupun penurunan yang ditampilkan oleh



kurva pada grafik pengaruh temperatur sintering terhadap nilai kekuatan spesimen.

Dari pengujian kekerasan, diperoleh nilai minimum pada variabel temperatur sintering 200°C dan persen massa poliamida 1.0% sebesar 11,67 HRB. Sedangkan nilai kekerasan minimum dicapai pada variabel temperatur sintering 300°C dan persen massa poliamida 1.5% sebesar 26 HRB. Secara umum, nilai kekerasan seluruh spesimen berada dalam rentang nilai kekerasan proyektil *frangible* minimum yang disyaratkan oleh Kruachatturat (2009) sebesar 54-119 HV (Vickers), di mana nilai 0 HRB setara dengan 70 HV dan 119 HV setara dengan 67.5 HRB. Selain itu, nilai kekerasan pada persen massa poliamida 1.5% juga melampaui nilai kekerasan pada temperatur 0.5% pada semua variabel.

Pada uji kekuatan tekan, nilai terendah diperoleh pada variabel temperatur sintering 300°C dan persen massa poliamida 0.5%, sebesar 83.54 MPa. Nilai tertinggi diperoleh pada variabel temperatur sintering 200°C dan persen massa poliamida 0.5%, sebesar 153.61 MPa. Secara umum, nilai kekuatan tekan semua spesimen berada dalam rentang nilai kekuatan tekan proyektil *frangible* yang disyaratkan oleh Kruachatturat (2009) yakni 31-310 MPa.



**Gambar 4.18.** a) Grafik hubungan antara persen massa poliamida pada spesimen dalam persen dengan modulus elastisitas spesimen dalam GPa. b) Grafik hubungan antara temperatur sintering spesimen dan modulus elastisitas spesimen dalam GPa,



Pada Gambar 4.18 tampak hubungan antara temperatur sintering dan persen massa poliamida spesimen dengan modulus elastisitas spesimen. Tampak bahwa kurva yang ditampilkan pada grafik yang dihitung dengan persamaan Nematzadeh (2012) secara umum tampak sama seperti grafik hubungan antara temperatur sintering dan persen massa poliamida spesimen dengan kekuatan tekan spesimen pada Gambar 4.16 dan 4.17. hal ini membuktikan bahwa pada spesimen komposit tembaga-poliamida, kekuatan tekan spesimen berbanding tepat lurus dengan modulus elastisitasnya.

Nilai modulus elastisitas tertinggi dan terendah, sama seperti nilai kekuatan tekan, dicapai pada masing-masing variabel persen massa poliamida 0.5% dan temperatur sintering 200 dan 300°C, sebesar 49,91 dan 41,59 GPa.

Untuk data rerata nilai kekuatan tekan dan kekerasan berdasarkan persen massa poliamida dan temperatur sintering dapat dilihat dalam tabel berikut.

**Tabel 4.1. Rerata nilai hasil pengujian terhadap persen massa poliamida**

Persen massa poliamida (%)	Kekuatan tekan rerata (MPa)	Kekerasan rerata (HRB)	Densitas rerata (gr/cm <sup>3</sup> )
0.5	127.76	21.33	6.77
1	129.14	14.33	6.40
1.5	97.54	24.89	6.29

**Tabel 4.2. Rerata nilai hasil pengujian terhadap temperatur sintering**

Temperatur Sintering (°C)	Kekuatan tekan rerata (MPa)	Kekerasan rerata (HRB)	Densitas rerata (gr/cm <sup>3</sup> )
200	127.73	18.56	6.25
250	116.73	20.44	6.66
300	109.98	21.56	6.46



#### 4.2. Pembahasan

Penelitian komposit tembaga-poliamida(nylon) 6 (Cu-PA 6) untuk aplikasi proyektil amunisi *frangible* dilakukan dengan menganalisis sifat mekanik berupa kekuatan tekan, modulus elastisitas dan kekerasan spesimen, serta mikrostruktur spesimen komposit untuk mengetahui karakter dari permukaan maupun bagian dalam spesimen komposit dalam rangka menganalisa hubungan antara persen massa poliamida dalam komposit dan temperatur sintering atau sintering terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur komposit. Sifat fisik berupa densitas dan porositas spesimen juga dianalisa untuk mengetahui penyebab fenomena yang diamati dari analisa sifat mekanik dan mikrostruktur. Data yang didapatkan dibandingkan dengan standar untuk proyektil *frangible* sehingga didapatkan persen massa poliamida dan temperatur sintering yang menghasilkan komposit tembaga-poliamida yang paling optimal untuk aplikasi tersebut.

Gambar 4.2 memperlihatkan penampakan dari butir tembaga dan poliamida sebelum dikompaksi. Dari gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa antarbutir tembaga yang memiliki bentuk dendritik (bercabang-cabang) berpotensi mengalami *interlocking* atau saling mengunci pada proses kompaksi seperti yang dikemukakan oleh German(1984). *Interlocking* yang terjadi mengakibatkan massa terkompaksi menjadi solid dan tidak mudah terdeformasi atau bahkan terdisintegrasi (pecah) setelah kompaksi selesai. Sedangkan butir poliamida memiliki permukaan yang halus dan berukuran lebih besar dari butir tembaga. Maka, antara tembaga dan poliamida potensi terjadinya *interlocking* menjadi lebih rendah. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bila deformasi berpotensi muncul dari batas butir antara tembaga dan poliamida.

Pengukuran densitas dan porositas pada spesimen tanpa sinter menunjukkan bahwa nilai persen massa poliamida berbanding terbalik dengan nilai densitas poliamida. Hal ini sesuai dengan hitungan teoritis dari densitas spesimen, karena massa jenis poliamida lebih rendah dari massa jenis tembaga, sehingga



bila massa poliamida semakin besar, maka semakin banyak ruangan dalam spesimen yang ditempati oleh poliamida terhadap tembaga, dan nilai densitas komposit menurun. Sedangkan nilai porositas cenderung berbanding lurus dengan persen massa poliamida. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan poliamida dalam komposit berkontribusi terhadap munculnya porositas. Pada Gambar 4.4 tampak bahwa butir tembaga tidak menempel erat pada butir poliamida, bahkan membentuk jeda terhadap batas butir poliamida sehingga menimbulkan porositas. Sementara itu pada Gambar 4.6 dan 4.10 teramati munculnya porositas besar, yang terbentuk cenderung di sekitar butir poliamida. Penampakan mikrostruktur ini membuktikan alasan peningkatan porositas seiring dengan peningkatan persen massa poliamida. Hal ini dapat dijelaskan dengan perbandingan nilai modulus resilien dari kedua bahan seperti yang tercantum pada Bab II, di mana nilai modulus resilien dari poliamida sebesar  $3,051 \text{ GJ/mm}^3$ , sedangkan nilai modulus resilien dari tembaga hanya sebesar  $5,04 \text{ MJ/mm}^3$ . Maka, pada proses kompaksi, setelah kompaksi dihentikan, butir poliamida berangsur kembali ke bentuknya semula, mendesak butir tembaga, dan membentuk porositas karena desakan tersebut.

Sementara itu, pada analisa hubungan persen massa poliamida dengan densitas dan porositas pascasinter, tampak dua anomali terhadap kurva hubungan yang ditunjukkan oleh spesimen tanpa sinter. Pertama, spesimen dengan variabel temperatur sintering  $300^\circ\text{C}$  memiliki nilai yang sangat rendah dibandingkan dengan spesimen lainnya pada persen poliamida 0.5% sekaligus bertentangan dengan kondisi spesimen tanpa sinter di mana densitas pada komposisi poliamida 0.5% mencapai nilai tertinggi. Selain itu, pada semua spesimen densitas pada persen massa poliamida 1.5% cenderung meningkat, atau seperti yang ditampilkan spesimen dengan variabel temperatur sintering  $250^\circ\text{C}$ , mengalami penurunan densitas yang cukup kecil dibandingkan dengan persen massa poliamida yang lebih rendah. Pada persentase tersebut juga terjadi penurunan porositas dengan kemiringan kurva lebih curam dari peningkatan densitas.



Untuk anomali yang terjadi pada spesimen dengan persen massa poliamida 0.5% pada temperatur 300°C, tampak pada hasil mikrostruktur pascasintering dari spesimen tersebut adanya porositas yang menunjukkan bentuk tepi yang agak menonjol. Selain itu, pada saat spesimen tersebut diambil dari *combustion boat* setelah proses sintering, spesimen tersebut agak rekat dengan *combustion boat*. Dapat disimpulkan bahwa selama proses sintering, terutama pada temperatur tinggi di mana viskositas poliamida menjadi lebih rendah, ada poliamida yang terdapat di permukaan spesimen yang meleleh keluar menuju *combustion boat*, meninggalkan porositas sebagai bekas keberadaan butir tersebut. Poliamida yang terletak dekat permukaan spesimen cenderung keluar spesimen akibat proses sintering ataupun sintering dilakukan pada atmosfer vakum, sedangkan kompaksi dilakukan pada atmosfer normal, sehingga pada saat sintering, poliamida yang menutupi porositas dan meleleh terdorong oleh porositas yang memiliki tekanan sebesar tekanan udara normal menuju keluar spesimen, di mana atmosfer di sekeliling spesimen adalah atmosfer vakum. Penampakan beberapa spesimen pascasintering pada temperatur 300°C yang memiliki butiran hitam di permukaannya, sebagai hasil pelelehan poliamida menjadi bukti fenomena ini. Faktor viskositas juga mempengaruhi anomali kedua di mana terjadi penurunan porositas yang memacu peningkatan densitas. Pada sintering, terutama mendekati dan setelah melewati titik lebur, butir-butir poliamida tersebut akan mengubah bentuk sesuai dengan celah yang ditempatinya, mengurangi porositas. Peningkatan densitas teramati pada persen poliamida 1.5% karena pada persen massa inilah efek hilangnya poliamida keluar seperti yang teramati pada anomali pertama lebih kecil bila dibandingkan penyesuaian yang dilakukan butir poliamida di dalam spesimen yang tidak meleleh keluar spesimen.

Pada analisa hubungan antara temperatur sintering terhadap densitas dan porositas spesimen, tampak pada Gambar 4.8 secara umum temperatur sintering sebanding dengan densitas dan berbanding terbalik terhadap porositas spesimen. Hal ini





sesuai dengan penampakan mikrostruktur pada Gambar 4.14, di mana semakin tinggi temperatur sintering, maka viskositas poliamida menurun dan poliamida akan mengisi porositas, sehingga porositas spesimen berkurang dan densitas spesimen meningkat. Adapun anomali yang tampak adalah penurunan densitas pada spesimen dengan variabel persen massa poliamida 1.5% dengan alasan yang sudah dijelaskan pada pembahasan hubungan persen massa poliamida.

Berhubungan dengan sifat mekanik spesimen, persen massa poliamida berbanding terbalik dengan kekuatan tekan spesimen, kecuali pada spesimen dengan persen massa poliamida 0.5% dan temperatur sintering 300°C. Kurva yang ditunjukkan pada grafik sesuai dengan kurva yang ditunjukkan grafik hubungan antara persen massa poliamida dan densitas spesimen pada Gambar 4.6. Maka anomali yang terjadi juga sesuai dengan penyebab anomali pada grafik Gambar 4.6 yaitu hilangnya poliamida akibat meleleh dan keluar dari spesimen.

Hubungan berbanding terbalik antara persen massa poliamida dengan nilai kekuatan tekan dapat dijelaskan dengan mikrostruktur spesimen di mana di antara batas butir poliamida dan tembaga, seperti pada Gambar 4.14 masih memiliki jeda yang cukup lebar apabila dibandingkan dengan antarbutir tembaga. Sehingga, ketika spesimen mengalami tegangan, dan tegangan mencapai batas butir antara tembaga dan poliamida, tegangan tersebut tidak ditransfer menuju poliamida. Keberadaan poliamida menjadi semacam rongga bagi sistem matriks poliamida, dan baik sudut maupun tepian rongga tersebut menjadi pemusatan tegangan yang menjadi awal mula dari terjadinya keretakan. Sementara itu, mikrostruktur dalam spesimen pada Gambar 4.15 menunjukkan poliamida yang meleleh dan mengikat butir tembaga di sekelilingnya. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme ketahanan spesimen terhadap tegangan adalah *interlocking* antar butir tembaga dan pengikatan oleh lelehan poliamida pada butir tembaga, dan mekanisme kegagalan spesimen adalah jeda antara batas butir poliamida dengan tembaga. Sementara itu, modulus



elastisitas spesimen juga berbanding terbalik terhadap persen poliamida spesimen, karena modulus elastisitas, seperti yang ditunjukkan oleh Nematzadeh (2004) sebanding dengan kekuatan tekan material.

Kekerasan spesimen berhubungan cukup komplikatif dengan persen massa poliamida dalam spesimen. Pada persen massa poliamida 0.5-1% cenderung menampakkan hubungan berbanding terbalik, tetapi pada rentang persen massa poliamida 1-1.5% menampilkan hubungan kesebandingan. Kurva hubungan antara persen massa poliamida dan kekerasan spesimen ternyata memiliki hubungan terbalik dengan kurva hubungan persen massa poliamida dan porositas spesimen pada Gambar 4.7, kecuali variabel temperatur 300°C pada persen massa poliamida 0.5% yang telah dibahas di awal Pembahasan. Maka, dapat disimpulkan porositas berpengaruh terhadap besarnya kekerasan spesimen komposit. Peningkatan kekerasan spesimen, terutama pada persen massa poliamida 1.5%, disebabkan oleh keberadaan poliamida di dalam spesimen yang semakin banyak, sehingga semakin banyak butir tembaga yang terikat oleh poliamida. Sistem ikatan ini membuat komposit menjadi lebih solid dan keras.

Hubungan antara temperatur sintering terhadap kekerasan dan kekuatan tekan spesimen, sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 4.17, adalah berbanding lurus untuk nilai kekerasan spesimen. Berdasarkan mikrostruktur spesimen, hal ini sejalan dengan peningkatan kemampuan batas butir dalam mengisi porositas, yang sejalan dengan berkurangnya porositas seiring dengan kenaikan temperatur sintering. Sementara itu kekuatan spesimen menurun pada rentang temperatur 200-250°C dan naik pada rentang 250-300°C. Penurunan nilai kekuatan tidak sebesar kenaikannya. Bila dilihat pada mikrostruktur, poliamida meleleh dan mengikat butir poliamida di sekitarnya sehingga dapat disimpulkan hal inilah yang menjadi faktor peningkatan kekuatan komposit.

Penggunaan suatu bahan sebagai proyektil *frangible* memerlukan batasan-batasan sifat material tertentu, terutama dari



sisi sifat mekanik. Nilai densitas semua spesimen telah melampaui batasan yang diberikan oleh Hansen (2008) yaitu  $1,75 \text{ gr/cm}^3$ - $8,25 \text{ gr/cm}^3$ , namun densitas yang melampaui batasan karakteristik uji tampak yang sesuai dengan amunisi non-*frangible* sebesar  $7,1$ - $8,5 \text{ gr/cm}^3$  hanya spesimen persen massa poliamida 0.5% tanpa sinter sebesar  $7,24 \text{ gr/cm}^3$  dan spesimen 0.5% poliamida dengan temperatur sinter/sintering  $250^\circ\text{C}$  sebesar  $7,14 \text{ gr/cm}^3$ . Semua spesimen melampaui batasan Kruachatturat (2009) dalam hal sifat mekanik yaitu kekerasan dan kekuatan tekan, seperti yang telah dikemukakan di bagian Analisa.

Maka, dari hasil pengujian dapat diambil beberapa kesimpulan. Pertama, persen massa poliamida yang menghasilkan densitas paling optimal adalah 0.5% karena menghasilkan nilai densitas tertinggi. Temperatur yang paling optimal adalah  $250^\circ\text{C}$ , karena selain menghasilkan nilai maksimal, pada temperatur tersebut dihasilkan rerata densitas tertinggi pada semua spesimen. Untuk kekuatan tekan, persen massa poliamida yang paling optimal adalah 1% karena menghasilkan rerata tertinggi, karena persen massa poliamida 0.5% selain menghasilkan nilai tertinggi juga menghasilkan nilai terendah. Temperatur yang menghasilkan kekuatan tekan paling optimal dengan rerata tertinggi adalah  $200^\circ\text{C}$ . Persen poliamida dengan nilai kekerasan paling optimal adalah 1.5%, dan temperatur dengan nilai kekerasan paling optimal adalah  $300^\circ\text{C}$ .

Dari Tabel 4.1 dan 4.2 tampak bahwa rerata total nilai pengujian dari semua spesimen per variabel temperatur ataupun per variabel persen massa poliamida. Tidak ada variabel yang mendominasi, namun variabel persen massa poliamida 0.5% dan temperatur sintering  $250^\circ\text{C}$  sama-sama memiliki rerata kekuatan tekan dan kekerasan terbaik kedua serta densitas terbaik. Oleh karena itu, dapat diambil kesimpulan bahwa variabel perseb massa poliamida 0.5% dan temperatur sintering  $250^\circ\text{C}$  adalah variabel yang paling optimal untuk menghasilkan proyektil *frangible* komposit tembaga-poliamida 6.



## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Persen berat poliamida(nylon)-6 terhadap massa total proyektil komposit tembaga-poliamida-6 yang menghasilkan sifat mekanik paling optimal sebagai proyektil frangible adalah 0.5% dengan kekuatan tekan 127.76 MPa, kekerasan rerata 21.33 HRB dan densitas rerata 6.77 gr/cm<sup>3</sup>
2. Temperatur pemanasan proyektil komposit tembaga-poliamida-6 yang menghasilkan sifat mekanik paling optimal sebagai proyektil frangible adalah 250°C dengan kekuatan tekan 116.73 MPa, kekerasan rerata 20.44 HRB dan densitas 6.66 gr/cm<sup>3</sup>.
3. Pengaruh mikrostruktur proyektil komposit tembaga-poliamida-6 terhadap sifat mekanik proyektil adalah pembentukan porositas di sekitar butir poliamida yang memperlemah komposit, difusi poliamida ke porositas pada temperatur tinggi yang meningkatkan kekerasan komposit, serta *interlocking* (saling mengunci) antar partikel tembaga yang menjadi faktor utama kekuatan komposit.

#### **5.2. Saran**

Dalam penelitian ini, salah satu faktor penting bagi kekuatan komposit adalah keberadaan porositas di antara butir besar poliamida dan partikel-partikel tembaga di sekelilingnya. Maka menurut penulis perlu dilakukan penelitian terhadap sifat mekanik komposit polimer-tembaga dengan metode produksi *injection molding* seperti yang dilakukan Belanger (1993), karena menurut penelitian ini difusi polimer ke dalam porositas menjadi factor penguat komposit, maka secara teori metode *injection molding* yang memberikan tekanan bersamaan dengan pemanasan



komposit membuat proses difusi dapat berlangsung lebih baik karena adanya bantuan tekanan dari luar.



## DAFTAR PUSTAKA

- Agency, U. S. E. P., 2012. *National Lead Free Wheel Weight Initiative (NLFWWI)*. [Online] Available at: <http://www.epa.gov/waste/hazard/wastemin/nlffw/wi.htm> [Accessed 20 01 2015].
- Anugraha, V. G., 2014. *Pengaruh Komposisi Sn dan Variasi Tekanan Kompaksi terhadap Densitas dan Kekerasan Komposit Cu-Sn untuk Aplikasi Proyektil Peluru Frangible dengan Metode Metalurgi Serbuk*, Surabaya: ITS.
- ASM, 1992. *ASM Metal Handbook Volume 4 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*. Ohio: ASM International.
- Bauccio, Michael. 1993. *ASM Metals Reference Book, 3<sup>rd</sup> Edition*. Ohio: ASM International.
- Bansal, R.K. 1996. *A Text Book of Strength of Materials*. New Delhi: Laxmi Publications.
- Banovic, S. W., 2007. Microstructural Characterization and Mechanical Behavior of Cu-Sn Frangible Bullets. *Materials Science and Engineering*, Volume 460-461, pp. 428-435.
- Behar-Levy, H. & Avnir, D., 2005. Silver Doped with Acidic/Basic Polymers: Novel, Reactive Metallic Composites. *Advanced Functional Materials*. 15(7), pp 1141-1146.
- Belanger, G. & Potvin, M., 1993. *Frangible Practice Ammunition*. United States of America, Patent No. 5,237,930.
- Benini, J. C., 2000. *Frangible Metal Bullets, Ammunition and Methods of Making Such Articles*. United States of America, Patent No. 6,090,178.



- Callister, W. D., 2003. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Hoboken: John Wiley and Sons
- Carlucci, D. E., 2012. *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. New Jersey: s.n.
- Davis, G. B. & Balner, J. R., 2001. *Jacketed Frangible Bullets*. United States of America, Patent No. 2001/0050020 A1.
- Firmansyah, K. M., 2015. *Pengaruh Temperatur Sintering Metode Metalurgi Serbuk Terhadap Frangibility dan Performa Balistik Peluru Frangible Komposit Cu-10% wt Sn*, Surabaya: ITS.
- Galanty, P. G., 1999. *Polymer Data Handbook*. s.l.:Oxford University Press.
- German, R. M., 1984. *Powder Metallurgy Science*. USA: Metal Powder Industries Federation.
- Golub, M. S., 2005. *Metals, Fertility, and Reproduction Toxicity*. Boca Raton: Taylor and Francis.
- Hansen, Richard D., 2008. *Bullet Composition*. United States of America, Patent No. 7392746 B2.
- Hash, M. J. & Pearson, T., 2011. *Frangible, Ceramic-Metal Composite Objects and Methods of Making the Same*. United States of America, Patent No. 8,028,626 B2.
- Heskel, D. L., 1983. A Model For Adoption Metallurgy in the Ancient Middle East. *Current Anthropology*, 24(3), pp. 362-366.
- Hirschhorn, J. S., 1969. *Introduction to Powder Metallurgy*. s.l.:American Powder Metallurgy Institute.
- Huffman, J. W., 2000. *Process of Making Obstacle Piercing Frangible Bullet*. United States of America, Patent No. 6,115,894.
- Jhony, P., 2014. *Analisa Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Sintering terhadap Ikatan Antar Muka pada Komposit Matrik Logam Cu-10% wt*



- Sn dengan Metode Metalurgi Serbuk*, Surabaya: ITS.
- Jones, W. D., 1960. *Fundamental Principles of Powder Metallurgy*. London: Edward Arnold.
- Kapeles, J. A. & Kolnik, J. P., 2005. *Frangible Non-lethal Projectile*. United States of America, Patent No. 2005/0066849 A1.
- Kruachaturrat, S., 2009. *Sintering Cu-Sn Materials for Frangible Bullets*. Bangkok, The 3rd Thailand Metallurgy Conference.
- Kuczynski, G. C., 1949. Self Diffusion in Sintering of Metallic Particle. *Trans. AIME*, Volume 185, pp. 169-178.
- Lippard, S. J. & Berg, J. M., 1994. *Principles of Bioinorganic Chemistry*. Mill Valley: University Science Books.
- Martinez, J. A. C., Ribas, J. M. & Grillot, A. L., 2013. *Frangible Bullet and Its Manufacturing Method*. United States of America, Patent No. 8,365,672 B2.
- Nematzadeh, M., 2012. Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Freshly Compressed Concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 34, pp. 476-485.
- Nesher, Guy, Marom, Gad & Avnir, David. 2008. Metal-Polymer Composites: Synthesis and Characterization of Polyaniline and Other Polymer@Silver Compositions. *Chem. Mater.* 20, pp 4425-4432.
- Pops, H., 2008. Processing of wire from antiquity to the future. *Wire Journal International*, pp. 58-66.
- Powers Jr., D. L., 2010. *Frangible Powdered Iron Projectiles*. United States of America, Patent No. 7,685,942 B1.





- Rheinmetall, 1982. *Hand Book on Weaponry*. Dusseldorf: s.n.
- Rossi, R., 1998. Simulation of Metal Powder Compaction, for the Development of A Knowledge Based Powder Metallurgy Process Advisor. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 74, pp. 94-100.
- Rydlo, M., 2010. Theoretical Criterion for Evaluation of the Frangibility Factor. *Advances in Military Technology*, 5(2).
- Schwartz, Mel M., 1984. *Composite Materials Handbook*. McGraw-Hill.
- Shahinpoor, et. al., 1998. Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biometric sensors, actuators, and artificial muscles - a review. *Smart Materials and Structures*, 7 (6), R15.
- Shter, et. al., 2007. Organically Doped Metals - A New Approach to Metal Catalysis: Enhanced Ag-Catalyzed Oxidation of Methanol. *Advanced Functional Materials*. 17(6). pp. 913-918.
- Snide, J. A. & Morrissey, E. J., 1986. *Variable Density Frangible Projectile*. United States of America, Patent No. 4,603,637.
- Sulistijono, 2012. *Mekanika Material Komposit*. Surabaya: ITS Press.
- Williams, K. T., 2004. *Method and Apparatus for Frangible Projectiles*. United States of America, Patent No. 6,799,518 B1.
- Williams, K. T., Maston, M. & Martin, S., 2008. *Method and Apparatus for Self-Destruct Frangible Projectiles*. United States of America, Patent No. 7,380,503 B2.



## Lampiran 1. Pengukuran densitas dan porositas

Poliamida (%)	Temperatur sinter (oC)	Nomor	Densitas (gr/cm <sup>3</sup> )	Densitas rerata (gr/cm <sup>3</sup> )	Porositas (%)	Porositas rerata (%)
0,5	27	1	7,36	7,24	0,86%	2,51%
		2	7,12		4,16%	
		3	7,24		2,51%	
	200	1	7,50	6,70	-1,03%	9,75%
		2	6,15		17,16%	
		3	6,45		13,11%	
	250	1	7,17	7,14	3,42%	3,83%
		2	7,11		4,25%	
		3	7,14		3,82%	
	300	1	5,96	5,98	19,74%	19,39%
		2	6,01		19,04%	
		3	5,97		19,39%	
1	27	1	5,95	6,53	22,02%	14,46%



1,5		2	6,66		12,71%	
		3	6,97		8,65%	
	200	1	6,00	5,90	21,43%	22,63%
		2	5,81		23,83%	
		3	5,89		22,63%	
	250	1	6,36	6,50	16,64%	14,81%
		2	6,64		12,97%	
		3	6,50		14,82%	
	300	1	6,78	6,69	11,19%	12,32%
		2	6,60		13,46%	
		3	6,69		12,31%	
	27	1	6,01	5,97	16,85%	17,48%
		2	5,92		18,17%	
		3	5,97		17,41%	
	200	1	6,03	6,15	16,58%	14,92%
		2	6,27		13,26%	
		3	6,15		14,92%	
	250	1	6,64	6,34	8,21%	12,29%

	300	2	6,05	6,70	16,37%	7,34%
		3	6,33		12,29%	
		1	6,97		3,59%	
		2	6,43		11,09%	
		3	6,70		7,34%	

## Lampiran 2: Data pengukuran uji tekan

Wt%	T (°C)	No.	Kekuatan Tekan (MPa)	Kekuatan tekan rata2 (Mpa)	Modulus elastisitas (Gpa)	Modulus elastisitas rata2 (Gpa)
0,50%	200	1	145,13	153,61	49085,12	49912,04
		2	162,08		50738,95	
		3	153,62		49912,05	
	250	1	147,64	146,15	49338,27	49180,43
		2	138,69		48421,28	
		3	152,11		49781,73	
	300	1	82,69	83,54	41462,80	41589,75



		2	84,39		41716,70	
		3	83,54		41589,75	
<b>1,00%</b>	200	1	115,87	127,35	45879,00	47123,18
		2	116,19		45916,98	
		3	150,00		49573,55	
	250	1	107,83	117,68	44899,82	46046,93
		2	111,24		45321,16	
		3	133,96		47919,82	
	300	1	137,45	142,38	48290,99	48800,08
		2	142,77		48844,29	
		3	146,91		49264,95	
<b>1,50%</b>	200	1	88,73	102,24	42349,06	44106,31
		2	115,74		45863,56	
		3	102,25		44106,31	
	250	1	107,34	86,37	44838,51	41876,74
		2	71,67		39721,34	
		3	80,11		41070,38	

	300	1	104,04	104,03	44109,34	44109,35
		2	130,47		47541,83	
		3	77,58		40676,88	

### Lampiran 3. Data pengukuran kekerasan

Poliamida Wt%	T (°C)	No.	HRB	HRB rerata
0,50%	200	1	18	21,00
		2	25	
		3	20	
	250	1	22	22,33
		2	21	
		3	24	
	300	1	23	20,67
		2	20	
		3	19	
1,00%	200	1	7	11,67
		2	13	



		3	15	
	250	1	10	13,33
		2	15	
		3	15	
	300	1	16	18,00
		2	20	
		3	18	
<b>1,50%</b>	200	1	25	23,00
		2	17	
		3	27	
	250	1	26	25,67
		2	25	
		3	26	
	300	1	25	26,00
		2	28	
		3	25	